

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA PASTILLA PIEZOELÉCTRICA EN EL SONIDO AMPLIFICADO DE UNA GUITARRA ACÚSTICA CON CUERDAS DE NYLON

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Julian Alejandro Torres Vargas**

ASESOR: Jorge Néstor Moreno Ruiz

**Lima, febrero del 2011**

## RESUMEN

El presente trabajo consiste en un estudio sobre la influencia de una pastilla piezoeléctrica en la calidad del sonido de una guitarra clásica. El mismo fue realizado íntegramente en el laboratorio de Acústica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, y está conformado por las siguientes partes:

- i) El Capítulo 1 describe la problemática que motiva la realización del estudio, la cual consiste en la pérdida de calidad en el timbre de la guitarra clásica, al utilizar para su amplificación o grabación una pastilla piezoeléctrica, en lugar de un micrófono. Se define el problema como una decoloración del sonido natural de la guitarra por parte de la pastilla.
- ii) El Capítulo 2 abarca todos los conceptos teóricos involucrados en la investigación realizada. Se incluyen brevemente conceptos a cerca del funcionamiento del instrumento y de la pastilla, así como conceptos relacionados al análisis de señales, y el procesamiento de las mismas utilizando filtros digitales.
- iii) El Capítulo 3 trata sobre la realización de las mediciones realizadas en el laboratorio, las cuales persiguen los objetivos de la investigación: Encontrar la razón por la que la pastilla piezoeléctrica afecta en gran manera el timbre natural de una guitarra clásica, así como proponer la solución a este problema. A lo largo de este capítulo se expone la metodología utilizada en cada medición, así como las gráficas pertinentes de los resultados obtenidos. Se realiza también un análisis en base a cada gráfica presentada. Finalmente, se propone la corrección de la influencia de la pastilla piezoeléctrica en el sonido de la guitarra a través del procesamiento de la señal de la pastilla. Este procesamiento se lleva a cabo de dos formas alternativas: a) Utilizando filtros disponibles en programas editores

de audio, y b) procesando la señal con filtros creados por el autor, con ayuda del software científico Matlab.

- iv) El Capítulo 4 complementa el análisis realizado en el capítulo 3, con respecto a las mediciones y los resultados obtenidos, y a los filtros utilizados en el procesamiento de la señal. Se incluye también una encuesta que evalúa cualitativamente la mejora obtenida al aplicar los diferentes filtros obtenidos. Finalmente, se culmina este capítulo con un análisis de los costos de la investigación realizada.
- v) El Capítulo 5 presenta las conclusiones del estudio realizado, las cuales siguen los lineamientos de los objetivos planteados. En este capítulo se concluye: a) Con respecto a la pastilla piezoeléctrica, que la razón por la que influye negativamente en la calidad sonora de la guitarra, es debido a su respuesta en frecuencia y a su ubicación, sobre el puente de la guitarra; b) el método más certero para la realización de las mediciones consiste en excitar el puente de la guitarra con ruido blanco, empleando un actuador, de manera que se pueda medir las señales de entrada y salida de la guitarra y pastilla respectivamente; c) La calidad del sonido de la pastilla, una vez procesado con el filtro FIR obtenido con Matlab es muy cercana (sino superior) a aquella obtenida con el programa editor de audio.
- vi) El Capítulo 6 contiene unos breves párrafos a cerca del trabajo futuro, teniendo como punto de partida la investigación realizada. Se mencionan aspectos como el desarrollo de filtros digitales en procesadores digitales de señales (DSPs), que puedan implementar la solución en tiempo real, y ser ofrecidos en el mercado. Se menciona también la implementación de la solución con filtros analógicos. Asimismo, la corrección del sonido de la pastilla se propone aplicando micrófonos pequeños de mediana calidad al interior de la boca de la guitarra, con el fin de que complementen la señal entregada por la pastilla, al captar principalmente las bajas frecuencias del instrumento, que son la principal carencia del transductor.

*aDios...*



## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE PASTILLAS DE CONTACTO	3
1.1. Entorno General: La Guitarra y la Música en el Perú	3
1.2. El Proceso en la amplificación de una Guitarra Acústica	3
1.3. La Problemática de nuestra Investigación	5
2. CONCEPTOS TEÓRICOS Y METODOLOGÍA	6
2.1. Partes de la guitarra y generación del sonido	6
2.2. Las Cuerdas	7
2.3. La Caja Acústica	9
2.3.1. Descripción general	9
2.3.2. La cavidad de aire y la resonancia de Helmholtz	9
2.3.3. La tapa frontal: modos de resonancia	10
2.3.4. Modelamiento y respuesta en frecuencia típica de la guitarra acústica	11
2.4. La pastilla piezoeléctrica	13
2.5. Conceptos sobre el análisis de señales	14
2.6. Diagrama de Bloques de la Guitarra Electroacústica	15
2.7. Cálculos y ecuaciones	15
2.7.1. Cálculos de respuesta en frecuencia	15
2.7.2. Corrección de la influencia de la pastilla en el timbre	16
2.8. Diseño de filtros digitales	17
3. PRUEBAS Y MEDICIONES	19
3.1. Objetivos de las Mediciones	19
3.2. Herramientas, instrumentos y equipos utilizados	20
3.3. Respuesta de la pastilla fuera de la guitarra	22
3.4. Respuesta de la caja y la pastilla	23
3.4.1. Conceptos generales para la medición	23
3.4.2. Medición con el método del martillo	25
3.4.3. Medición con el método del rasqueo natural	27
3.4.4. Medición con el método del actuador	29
3.5. Procesamiento de la señal de la pastilla usando filtros digitales	33

3.5.1. Ecualización práctica con ecualizador de tres bandas	33
3.5.2. Ecualización con software editor de audio	34
3.5.3. Desarrollo del filtro ecualizador digital en Matlab	36
4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	39
4.1. Comparación entre los métodos de medición	39
4.2. Comparación entre los filtros con software comercial y científico	41
4.3. Análisis de costos de la investigación	41
4.4. Encuesta sobre los resultados obtenidos	42
5. CONCLUSIONES	44
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	46
7. BIBLIOGRAFÍA	47



## INTRODUCCION

La música hoy en día ha alcanzado un nivel que no se habría concebido algunos siglos atrás. La posibilidad de grabar canciones o cualquier tipo de sonidos, pudiendo de escucharlos en el momento, lugar intensidad e incluso calidad que se desee son adelantos que debemos a la Electroacústica, rama de la Física (más concretamente de la acústica) y de la Electrónica, que hace posible convertir el sonido, por ejemplo de algún instrumento musical, en señales eléctricas, procesar dichas señales, y luego volver a convertirlas en sonido amplificado o simplemente procesado.

En este contexto encontramos a la guitarra, instrumento que goza de gran popularidad en nuestros días, con participación en la mayoría de estilos y géneros musicales. La guitarra acústica, a diferencia de la eléctrica, es un instrumento que no requiere dispositivos electrónicos para su ejecución. Sin embargo, es innegable la necesidad de convertir la señal acústica de este instrumento –con la mayor fidelidad posible- en una señal eléctrica que pueda ser amplificada o procesada. En respuesta a esta necesidad se ha desarrollado diversos tipos de transductores (dispositivos que convierten señales acústicas en eléctricas y viceversa), los cuales de acuerdo a su modo de funcionamiento se clasifican principalmente en micrófonos y pastillas. Ambos tipos de transductores logran el propósito mencionado, con mayor o menor fidelidad. A veces, al no ser posible usar una pastilla o micrófono de la calidad deseada, se emplea diversos tipos de procesadores para compensar estas “pérdidas” en la calidad del sonido debido a la pastilla y equipos de amplificación usados. Los procesadores utilizados van desde pequeños ecualizadores hasta complejos y costosos sistemas de procesamiento digital -ya sea en Hardware o en Software-, siempre con el objetivo de lograr la mejor calidad en el sonido final del instrumento.



Preguntas como: ¿Por qué el sonido de una guitarra electroacústica se degrada tanto al conectar la guitarra a un amplificador, usando la pastilla? ¿Y por qué amplificando la guitarra con un buen micrófono el instrumento se escucha tan natural y rico? ¿Cómo se genera el sonido en una guitarra? ¿Es igual la generación y el procesamiento del sonido para una guitarra electroacústica con cuerdas de nylon que para una con cuerdas de metal? ¿Es posible obtener toda la riqueza sonora del instrumento usando la pastilla, sin un micrófono, o con uno de bajo costo?... entre otras, son las que motivan al autor (quien además es músico y, por ende, amante del buen sonido del instrumento) a realizar la presente Tesis, la cual tiene como objetivo final corregir el sonido (o mejor dicho, la señal eléctrica) que entrega la pastilla de una guitarra electroacústica, a fin de que se asemeje el máximo posible al sonido natural del instrumento.

El presente documento está dividido en cuatro capítulos: En el Capítulo 1 se presenta la problemática en torno al uso de pastillas piezoeléctricas para la amplificación de la guitarra acústica, con sus ventajas y desventajas; el Capítulo 2 se encarga de la parte teórica necesaria para realizar la investigación y mediciones de laboratorio. En el Capítulo 3 se aborda la parte experimental, centrando el análisis a una pastilla piezoeléctrica particular en una guitarra clásica con cuerdas de Nylon; el Capítulo 4 consiste en el Análisis de los Resultados obtenidos de las mediciones, donde se explica la principal razón por la que la pastilla no es tan efectiva en entregar el sonido natural deseado de la guitarra; el capítulo 5 habla de las conclusiones obtenidas, y finalmente, el capítulo 6 cubre algunas observaciones a la investigación realizada y el trabajo futuro proyectado, a partir de los resultados de la presente tesis. Asimismo, se pretende proponer una solución al problema de la distorsión que sea práctica, eficiente y económica, alternativa a los métodos ya existentes, teniendo como resultado de este trabajo, que la realización de un análisis minucioso de la calidad sonora de un instrumento musical amplificado como la guitarra acústica o electroacústica, y el conocimiento y estudio de las tecnologías existentes en el campo de la electrónica, nos dan la claridad y el panorama necesarios para elaborar proyectos que busquen desarrollar y ubicar en el mercado equipos que sean eficientes en la mejora de la calidad del mencionado instrumento.



## 1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE PASTILLAS DE CONTACTO

### 1.1. Entorno General: La Guitarra y la Música en el Perú

En el Perú existe un mercado musical en crecimiento. Si bien formalmente aún no estamos al nivel musical de otros países de Latinoamérica, apuntamos hacia ello. Esto lo podemos ver en el ejemplo de los institutos y universidades que en los últimos años se han creado con el propósito de dar una formación profesional en el ámbito de la música y el audio, tanto en la parte técnica como artística. También estamos siendo testigos de un importante y reciente protagonismo del Perú como plaza atractiva para conciertos y Mega conciertos a cargo de renombrados artistas internacionales. Esto implica que la exigencia en la calidad de los Equipos de Sonido (Consolas, Amplificadores, Procesadores, etc.) en nuestro país es mayor a la que era hace unos años, y continúa en aumento.

Por lo expuesto anteriormente, podemos afirmar que el contexto a nivel nacional es idóneo para una investigación en pro de mejorar la calidad del sonido en vivo de un elemento central en las diversas manifestaciones musicales como la guitarra, así como de fomentar el desarrollo de tecnología y productos que procuren la mencionada mejora en la calidad a un costo accesible.

### 1.2. El Proceso en la amplificación de una Guitarra Acústica

Existen diversos aspectos que considerar cuando hablamos de la amplificación del sonido de una guitarra. El primero (y principal) de ellos es el concerniente al uso de un transductor, que se encargue de convertir el sonido de ésta en una señal eléctrica, que sea una representación fiel del sonido real; para luego ser procesada y amplificada.

Para tal fin, existe un sinnúmero de marcas, modelos y diseños de transductores disponibles en el mercado. Estos transductores se clasifican principalmente en dos grandes grupos: Los micrófonos propiamente dichos, y las pastillas de contacto. La gran diferencia radica en la naturaleza de la señal que el transductor recibe, para ser convertida a una señal eléctrica: los micrófonos reciben las ondas acústicas del aire, el cual hace vibrar un pequeño diafragma al interior del micrófono, cuyo movimiento mecánico luego se traduce en una señal eléctrica. Los micrófonos usados para esta aplicación, son dinámicos o de condensador, el uso de uno u otro tipo depende de la aplicación, generalmente los dinámicos se emplean en escenarios, mientras que los de condensador se usan en estudios de grabación [15]. Las pastillas de contacto en cambio, no perciben una señal acústica (proveniente del aire), sino una señal mecánica, la cual proviene directamente de la vibración del cuerpo de la guitarra [10]. Las principales ventajas de las pastillas de contacto sobre los micrófonos son el menor costo y la portabilidad, ventajas que se ponen de manifiesto al hacer música en vivo, donde utilizar una pastilla anula la posibilidad de captar sonidos indeseados de otros instrumentos, lo cual podría ocurrir si se utilizan micrófonos, e incrementa la posibilidad de desplazarse el guitarrista por el escenario. Sin embargo, las pastillas presentan una desventaja en cuanto a calidad sonora, y la diferencia es claramente apreciable casi por cualquier oyente con un oído medianamente educado. Los micrófonos son la opción indiscutible y predilecta para realizar grabaciones en estudio, puesto que el micrófono se encuentra en un punto en el que puede captar no sólo el sonido emitido por las cuerdas y su interacción con la cavidad resonante, sino también la radiación emitida por las paredes de esta última. La pastilla en cambio, se adhiere a un punto específico en la caja acústica (ya sea entre el puente y las cuerdas o en algún otro punto de la tapa superior), y se ve imposibilitada de captar con la misma riqueza, la interacción de las cuerdas con la cavidad resonante.

### 1.3. La Problemática de nuestra investigación

La problemática de esta investigación consiste en hallar en qué consiste el efecto de la pastilla piezoeléctrica en la amplificación del sonido de una guitarra acústica clásica, con cuerdas de nylon; y de qué manera este efecto puede corregirse o compensarse, usando el filtrado digital. Para ello, se tomará medidas de la respuesta en frecuencia de la guitarra, así

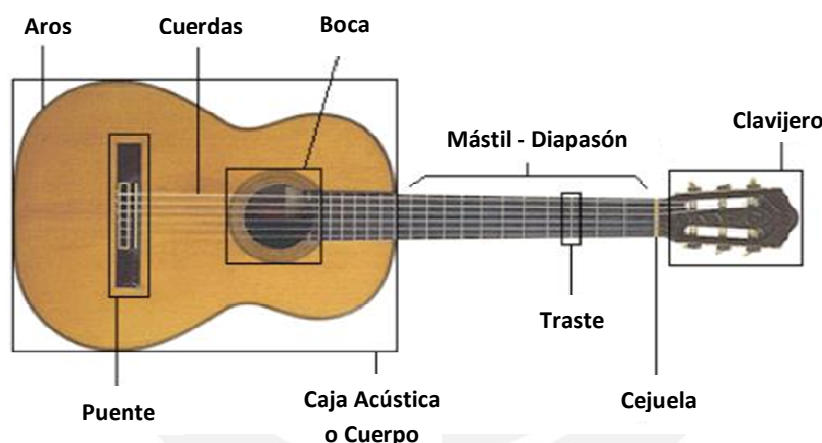
como de una pastilla piezoeléctrica (ya que este material es el más usado para la fabricación de las mismas), se realizará un análisis de las mismas y, finalmente, se desarrollará a partir de los resultados un filtro digital que compense el efecto de la pastilla.



## 2. CONCEPTOS TEÓRICOS Y METODOLOGÍA

### 2.1. Partes de la guitarra y generación del sonido

Las partes principales de la guitarra acústica se listan en la Figura 2.1. La única diferencia en la guitarra electroacústica, es la inclusión de la pastilla debajo del puente.



**FIGURA 2.1.** Partes de una guitarra acústica. [20]

El proceso de generación del sonido de una guitarra electroacústica es una combinación de procesos mecánicos, acústicos y eléctricos; cada uno de los cuales depende de partes de la guitarra en particular, las cuales en su conjunto, definen el color y el timbre característico del sonido del instrumento. En este sentido, existen tres partes principales involucradas en la generación del sonido de la guitarra acústica: i) Las cuerdas; ii) El puente y iii) El cuerpo (en adelante, “caja acústica”, “caja de resonancia” o simplemente “caja”). En el caso de la guitarra electroacústica, existe un cuarto componente: iv) La pastilla.

- 1) El ejecutante pulsa las cuerdas, las cuales vibran en sus frecuencias fundamentales y armónicas, según las notas determinadas al pisar o no los trastes respectivos. La vibración de las cuerdas genera una vibración en el aire circundante que es

demasiado pequeña para ser oída [10]. Sin embargo, la vibración mecánica generada por las cuerdas será aprovechada por la caja acústica para convertirse en el sonido radiado por el instrumento. La característica del sonido final depende, en gran parte, de las propiedades del material de las cuerdas, y la manera en que se pulsan o “atacan”.

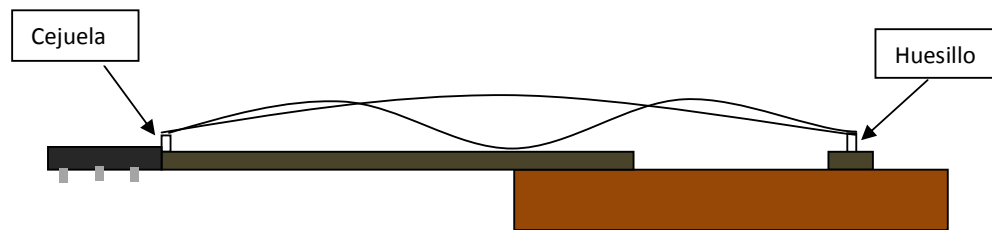
- 2) La suma de señales de las seis cuerdas es transmitida al puente, el cual actúa como una interfaz de acoplamiento, con la función de transmitir las vibraciones mecánicas de las cuerdas a la caja acústica –que actúa como amplificador de estas señales mecánicas, y las convierte en una señal acústica de suficiente intensidad para ser oída. El puente entonces es de vital importancia, pues un mal acoplamiento –como un mal pegado del puente en la caja o un mal ajuste de las cuerdas- alterará las características de la señal que reciba la caja, y por ende, el sonido final.
- 3) La caja acústica es un resonador, cuya función es amplificar las pequeñas vibraciones mecánicas recibidas a través del puente. Está conformada por la tapa frontal, la tapa posterior y los aros (placas de madera laterales). El interior de la caja es hueco y las tapas están reforzadas por el interior por varillas de madera. El conjunto de elementos, incluyendo el aire dentro de la caja, dan forma a la respuesta en frecuencia de la caja. Esta respuesta posee resonancias prominentes en bajas frecuencias, y colorea la señal proveniente de las cuerdas, dándole el timbre y la reverberancia característicos al sonido de la guitarra.

En los párrafos siguientes, se describe con más detalle las características de los elementos implicados en la generación del sonido de la guitarra.

## 2.2. Las Cuerdas

Las cuerdas son la parte más representativa de la guitarra. Cumplen la función de determinar las notas musicales que el instrumento radiará al ambiente. Para este fin, cada cuerda, al ser pulsada por el ejecutante, vibra en un gran número de frecuencias armónicas, siendo el armónico de menor valor, la frecuencia fundamental, y por lo general, la de mayor intensidad. En la Figura 2.1 se aprecia el gráfico de una cuerda vibrando en su modo fundamental y en su tercer armónico (estos armónicos en la realidad, se superponen).

Como se ve en la figura, la longitud efectiva de una cuerda en reposo está delimitada en un extremo, por la cejuela (cerca al clavijero), y en el otro, por el huesillo que se coloca encima del puente (sobre la caja acústica).



**FIGURA 2.2.** Modelo de una cuerda de guitarra vibrando en el modo fundamental y en su tercer armónico. La longitud efectiva de vibración de la cuerda va desde la cejuela, justo antes del clavijero, hasta el huesillo, ubicado en el puente. (Elaboración propia).

La afinación de cada una de las 6 cuerdas con su respectiva frecuencia fundamental se muestra en la Tabla 2.1, siendo la nota más grave aquella equivalente a  $Mi_2$ , cuya frecuencia fundamental es de 82.41 Hz.

Cuerda	Nota	f (Hz)	Cuerda	Nota	f (Hz)
1°	E' = Mi'	329.63	4°	D = Re	146.83
2°	B = Si	246.94	5°	A = La	110
3°	G = Sol	196	6°	E = Mi	82.41

**TABLA 2.1.** Cuerdas de la guitarra acústica, con sus respectivos valores de frecuencia fundamental. La nota más aguda posible en la guitarra clásica es  $Si_5 = 987.76$  Hz.

La afinación de cada cuerda al aire depende principalmente de tres factores: El Material y masa de la cuerda, la longitud efectiva de la misma, y su tensión.

Con respecto al material y masa de la cuerda, las cuerdas pueden ser de nylon o de metal. El material de las cuerdas afecta, entre otras cosas, la respuesta en frecuencia de las cuerdas. Por ello, una guitarra con cuerdas de nylon tiene un timbre con menor presencia de altas frecuencias que una con cuerdas de metal. Por otro lado, es bien sabido que la longitud efectiva y tensión de una cuerda determinan la frecuencia de la vibración de la misma.

Las cuerdas poseen diversas características, entre las cuales destacan: La influencia del “punto de ataque” (según donde se pulse la cuerda, ya sea cerca a la boca o cerca al puente, cambiará el timbre del sonido); la vibración por influencia (vibración de cuerdas que

no fueron pulsadas); modulación de tensión; reverberancia de dos etapas; y otros que se pueden consultar en la bibliografía [24]. Su influencia no es tan importante en el presente estudio.

### 2.3. La Caja Acústica

#### 2.3.1. Descripción general

La caja acústica hueca de la guitarra juega un rol importantísimo en el sonido del instrumento, pues es quien amplifica la señal excitadora proveniente de las cuerdas. Por ello, la caja de la guitarra es la parte que más contribuye en el timbre. Es en realidad un sistema (con una respuesta en frecuencia determinada) cuya señal de entrada mecánica (el movimiento de las cuerdas) es amplificada, para ser radiada acústicamente al ambiente, con el timbre y sonido característico de la guitarra. Es equivalente a esta última afirmación decir que la caja “colorea” y define el timbre del sonido final de la guitarra, según el valor de frecuencia y magnitud de sus resonancias particulares. La calidad del material y construcción de la caja, entonces, determina en gran medida los parámetros de las resonancias de la caja, y por ende, la diferencia de calidad sonora entre una guitarra corriente -con un sonido débil y apagado, y una fina -con un sonido robusto, con el timbre e intensidad correctos.

#### 2.3.2. La cavidad de aire y la resonancia de Helmholtz

Un resonador de Helmholtz ideal consiste en una cavidad de volumen  $V$  con un cuello o ducto de área transversal  $S$  y longitud  $L$  (por ejemplo: una botella de plástico). Si la longitud de onda  $L$  es grande comparada con sus dimensiones, el aire del cuello se mueve como un bloque de masa  $m$ . Asimismo, el aire contenido en la cavidad, de volumen  $V_0$  actúa como un resorte de constante elástica  $k$  (o elasticidad  $1/k$ ). De esta manera, la cavidad y el ducto se comportan como un sistema *Masa-Resorte* [17], lo cual define al resonador de Helmholtz, que por su naturaleza se comporta como filtro pasa banda. Es decir, el resonador, al momento de radiar filtrará cualquier resonancia –acústica o mecánica- que trate de superponerse a la radiación de la resonancia del sistema.

El cuerpo de la guitarra es un Resonador de Helmholtz, donde la boca representa el cuello, el cual tiene longitud física de unos pocos milímetros -a esta longitud debe añadirse un efecto importante de carga de aire, el cual se manifiesta como un incremento de longitud, la



cual es función del radio-; el volumen del resonador viene dado por el aire contenido dentro de la caja acústica. Las medidas típicas de una guitarra clásica son: una longitud de cuello de unos 4 mm, diámetro de alrededor de 8cm, y un volumen de aire interno entre los 15000 y 17000 cm<sup>3</sup>. De esta forma, la primera contribución de la caja en el timbre de la guitarra consiste en la resonancia de Helmholtz. La expresión para hallar la frecuencia de resonancia del resonador viene dada por:

$$f = \left(\frac{c}{2\pi}\right) \left(\sqrt{\frac{a}{L' \cdot V_0}}\right)$$

$c$ : Velocidad del Sonido en el Aire

$r$ : Radio del Cuello

$V_0$ : Volumen de aire dentro de la caja.

$a$ : Área del Cuello

$L'$ : Longitud Efectiva del cuello, con:  $L' = l + 1.4 \cdot r$

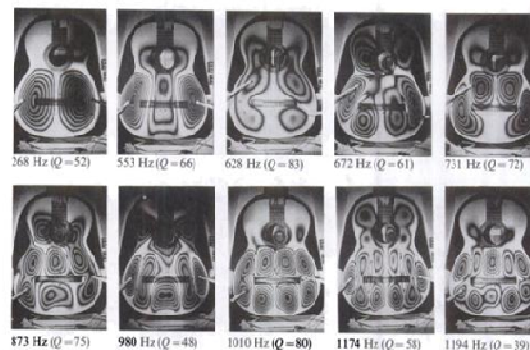
$l$ : Longitud del Cuello.

La resonancia o modo de Helmholtz constituye la resonancia más baja del sonido de la guitarra acústica, y ocurre típicamente entre los 80 y 110 Hz [17].

### 2.3.3. La tapa frontal: modos de resonancia

Entre las tapas de madera que conforman la Caja Acústica, la tapa frontal -hecha típicamente de pino o píce, es la más flexible [10], y también la que recibe la señal excitadora de las cuerdas. Por tanto, es la que, al vibrar a manera de un pistón, radia sonido al ambiente, superponiéndose a la radiación proveniente del resonador de Helmholtz.

La tapa acústica, como toda superficie, posee distintos modos de resonancia (ondas estacionarias, en 2 dimensiones, que se forman en la superficie de la tapa a determinadas frecuencias fundamentales y armónicas). En la Figura 2.5 se puede apreciar algunos de estos modos en la tapa frontal de una guitarra clásica común.



**FIGURA 2.3.** Algunos modos de la tapa frontal. La resonancia más baja típicamente se da alrededor de los 200 Hz. [14]

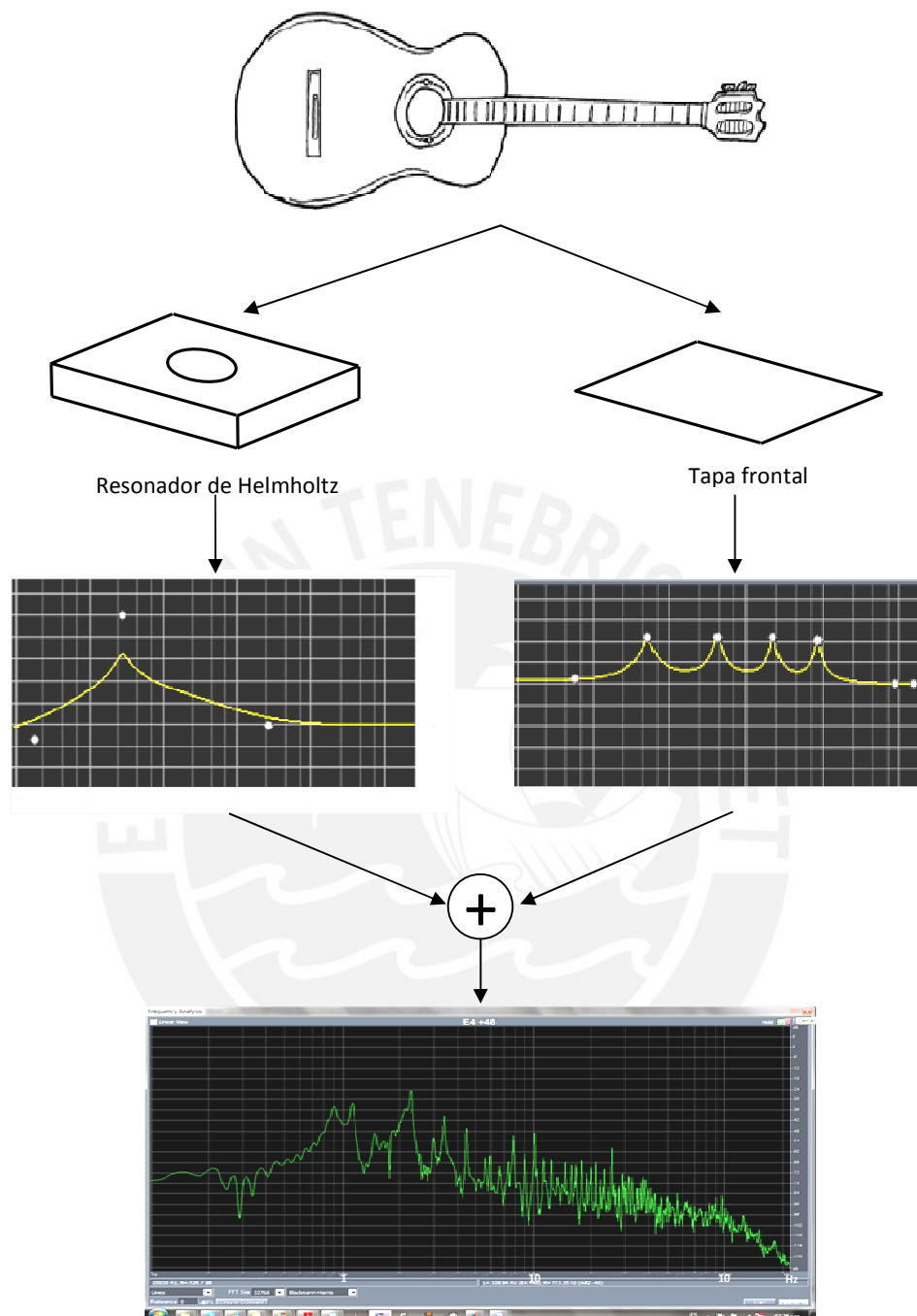
Como es fácil de deducir, el primer modo (o frecuencia fundamental) de la Caja es el que tiene la mayor amplitud. Este primer modo de la tapa frontal está por lo general entre los 180 y 230 Hz (baja frecuencia), y contribuye, al igual que la resonancia de Helmholtz, a dar el cuerpo y timbre característicos a la guitarra. [3].

### 2.3.4. Modelamiento y respuesta en frecuencia típica de la guitarra acústica

De lo expuesto acerca de las resonancias de la caja, se puede plantear el modelamiento de la caja acústica, la cual como ya se ha mencionado, consta de dos elementos principales: el resonador de Helmholtz y la tapa frontal. Las ecuaciones que permiten el cálculo del nivel de presión sonora para ambos elementos son conocidas [17, 25]. La figura 2.4 ilustra, mediante el uso de filtros, lo mencionado, así como la respuesta en frecuencia global de la guitarra, que resulta de la superposición de la respuesta del resonador y de la tapa.

Asimismo, es posible hacer un paralelo entre la caja acústica de la guitarra, y el cajón peruano, y ver que existe similitud en sus comportamientos, con la diferencia de que en este último, el ducto del resonador de Helmholtz se encuentra en la cara opuesta a la tapa donde se produce la excitación. Dada dicha similitud, se puede realizar el modelamiento de la caja acústica de la guitarra utilizando el mismo circuito eléctrico equivalente usado en [26], donde se incluye con detalle la contribución de los elementos ya mencionados: resonador de Helmholtz y tapa.

Como se aprecia en la figura 2.4, la respuesta en frecuencia de una guitarra acústica clásica (medida con un micro direccionado a la boca de la misma) posee una alta energía en bajas frecuencias, predominando en esta región las dos resonancias más graves: la correspondiente al resonador de Helmholtz (alrededor de 100 Hz), y la correspondiente al primer modo de la tapa frontal (alrededor de 200 Hz). La energía va decayendo para frecuencias mayores, hasta ser casi despreciable arriba de 10kHz. La figura 2.5 ilustra lo mencionado. Esta es la “coloración” o timbre que la caja acústica como conjunto imprime en la señal proveniente de las cuerdas.



**FIGURA 2.4.** Contribución de las dos partes principales de la caja en el timbre de la guitarra, y Respuesta en frecuencia típica de una guitarra acústica. Las dos primeras resonancias (alrededor de 100 Hz y 200 Hz) son las de mayor energía. (Elaboración: propia).

## 2.4. La Pastilla Piezoeléctrica

La pastilla piezoeléctrica es el tipo más común de transductor usado en la amplificación de la guitarra. Es un transductor “de contacto” porque está en contacto físico con la superficie vibratoria del instrumento. En la figura 2.5 se muestra una pastilla piezoeléctrica típica.



**FIGURA 2.5.** Fotografía de una pastilla piezoeléctrica, donde se aprecia el transductor propiamente dicho, como el jack que sirve como interfaz de salida [24].

El Principio de Funcionamiento es el siguiente: La Pastilla está colocada dentro de una ranura en el puente, debajo del huesillo, justo donde termina la longitud efectiva de las cuerdas (Ver figura 1.1). De este modo, las vibraciones mecánicas de la tapa frontal (en ese punto) y de las cuerdas imprimen una fuerza en el material piezoeléctrico dentro de la pastilla. Esta fuerza se traducirá en un voltaje a la salida del material piezoeléctrico [10] que será proporcional a la fuerza aplicada. De esta manera, la señal eléctrica (del orden de amplitud de los mili voltios) entregada por la pastilla refleja en gran medida el sonido de la guitarra. Como es evidente, la pastilla entrega un sonido alterado, cuya respuesta en frecuencia difiere del sonido percibido directamente del instrumento.

Según lo descrito en el párrafo anterior, la fuerza  $F$  sobre el cristal debida a la masa  $m$  es proporcional a la aceleración  $a$  y a  $m$  según la 2da Ley de Newton:

$$F = m \cdot a$$

De esta fórmula podemos deducir que la masa de la pastilla afecta el valor de  $F$ , y por tanto, el nivel de la señal de salida. Asimismo, el voltaje a la salida es también proporcional a la aceleración [10].

La respuesta en frecuencia de este tipo de transductores dista mucho de ser plana (lo cual sería ideal), por un tema de precios y de competitividad en el mercado. Por ello se suele encontrar picos de resonancia en medias y altas frecuencias.

## 2.5. Conceptos relacionados al análisis de señales

**a. Autoespectro.-** El Autoespectro es el resultado de promediar una determinada cantidad de “espectros instantáneos” de una señal. Estos espectros instantáneos se obtienen aplicando la Transformada Rápida de Fourier (TRF) a una señal en una ventana pequeña de tiempo [18]. A partir del autoespectro de dos señales podremos obtener la respuesta en frecuencia.

**b. Respuesta en Frecuencia.-** Es el dato más importante que obtendremos del análisis de nuestras señales. A la Respuesta en Frecuencia se le suele llamar “Función Transferencia”; pero estrictamente hablando, la Respuesta en Frecuencia es un caso particular de la Función Transferencia, en el cual sólo consideramos los valores en el eje imaginario del plano de Laplace [18].

La Respuesta en Frecuencia caracteriza a los SLITs (Sistemas lineales e invariantes en el tiempo; se asume que las cuerdas tienen un comportamiento lineal, puesto que para las mediciones, se pulsarán con una amplitud pequeña). Y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$H(f) = \frac{B(f)}{A(f)}$$

Donde A(f) y B(f) son la Transformada Rápida de Fourier (TRF) de las señales de entrada y salida respectivamente.

**c. Estimación de la respuesta en frecuencia a partir del autoespectro.-** Si bien es cierto el autoespectro y la respuesta en frecuencia no son lo mismo, en ocasiones en las que es muy difícil medir la señal de entrada a un bloque o sistema, se procura que la señal de entrada sea lo más plana posible en el rango de interés (y así su valor sea “uno”), y se acepta el autoespectro de la salida como una estimación de la respuesta en frecuencia del sistema.

**d. Coherencia.-** La coherencia en un SLIT da una medida de la dependencia lineal entre la salida y la entrada. Su valor (entre 0 y 1) se determina a partir de los Autoespectros de la entrada y salida, y el Espectro cruzado [18], mediante la fórmula:

$$\gamma^2 = \frac{|G_{AB}(f)|^2}{G_{AA}(f) \cdot G_{BB}(f)}$$

La principal aplicación de la función coherencia es verificar la validez de otras funciones, para determinar si están influenciadas ya sea por ruido o por no linealidades. Aunque

una coherencia baja no significa necesariamente que una medición sea inválida, sí indicará a veces que se requiere un gran número de promedios para dar un resultado válido. Para este estudio, se esperará que la coherencia tenga un valor por lo menos superior a 0.85 en el rango de frecuencias de interés (de 20 Hz a 10 kHz), para asegurar la confiabilidad de las mediciones.

## 2.6. Diagrama de Bloques de la Guitarra Electroacústica

En la figura 2.10 se muestra el diagrama de bloques de la guitarra electroacústica, desde el punto de vista de la generación de las señales acústica y eléctrica. El bloque “Cuerdas” actúa como el generador de la señal. Sin embargo, son los bloques finales (“Caja acústica” y “pastilla”) quienes colorean y dan el timbre final a dicha señal (el bloque “puente” se asume de respuesta en frecuencia plana [10]). La respuesta en frecuencia de la caja y la pastilla son muy distintas, como se mencionó en los puntos 2.3.4. y 2.4, y de esta diferencia surge la baja calidad sonora al amplificar el instrumento con una pastilla.

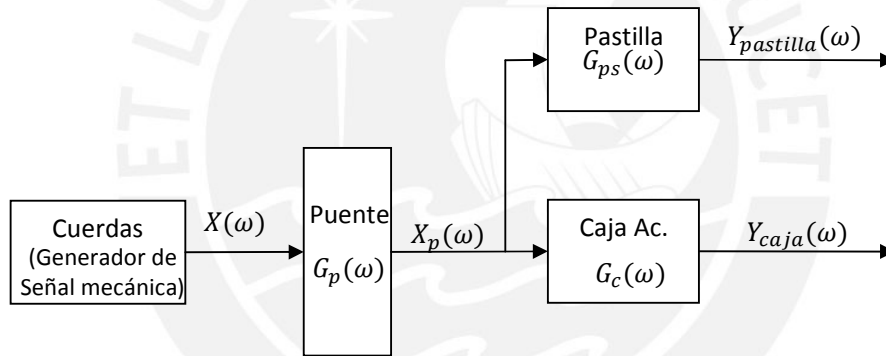


FIGURA 2.6. Diagrama de Bloques del Sistema Guitarra Acústica.

## 2.7. Cálculos y Ecuaciones

### 2.7.1. Cálculos de respuesta en frecuencia

Se deduce, de la figura anterior, que si la respuesta en frecuencia de la pastilla  $G_{ps}(\omega)$ , pudiera llegar a ser exactamente igual que la respuesta de la caja  $G_c(\omega)$ , se corregiría completamente la influencia negativa de la pastilla en el timbre natural de la guitarra. Por tanto, la respuesta de la caja  $G_c(\omega)$ , es la respuesta en frecuencia esperada para el bloque “pastilla”. Para obtener  $G_c(\omega)$ , se debe hacer el siguiente cálculo:

$$G_c(\omega) = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{Y_{caja}(\omega)}{X_p(\omega)} = \frac{Y_{caja}(\omega)}{X(\omega)}$$



La respuesta en frecuencia de la pastilla montada en la caja es:

$$G_{ps}(\omega) = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{Y_{pastilla}(\omega)}{X_p(\omega)} = \frac{Y_{pastilla}(\omega)}{X(\omega)}$$

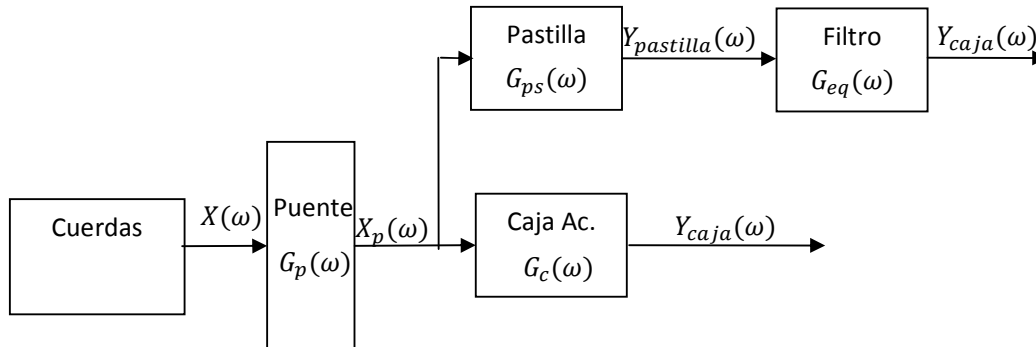
La respuesta en frecuencia de la pastilla propiamente dicha (esto es, sin estar montada debajo del puente) es distinta a la que se obtiene de la pastilla montada en la guitarra. Esto se debe a que cuando la pastilla está colocada bajo el puente, no recibe una señal de entrada plana en el rango de frecuencias, sino que su forma está determinada por las vibraciones de la tapa frontal y de las cuerdas. Para obtener la respuesta en frecuencia real de la pastilla sería necesario desmontarla y excitarla con una señal plana en el rango de frecuencias (por ejemplo, el golpe de un martillo).

Una vez obtenidas  $G_{ps}(\omega)$  (con la pastilla montada en la guitarra) y  $G_c(\omega)$ , la influencia de la pastilla en el sonido natural de la guitarra, o dicho de otro modo, la diferencia que genera la pastilla en el sonido de la guitarra con respecto a su sonido natural, es:

$$G_{dif}(\omega) = \frac{G_{ps}(\omega)}{G_c(\omega)}$$

### 2.7.2. Corrección de la influencia de la pastilla en el timbre

La señal que entrega la pastilla es corregible en la medida en que se acerque la respuesta en frecuencia de la pastilla lo máximo posible a la respuesta esperada, es decir, la hallada para el sistema Caja acústica ( $G_c(\omega)$ ). En tal sentido, es posible desarrollar un bloque, (digital o analógico), que tenga una respuesta en frecuencia de ecualización  $G_{eq}(\omega)$ , cuya señal de entrada sea aquella a la salida de la pastilla. Eso permitiría obtener una respuesta similar al sonido natural  $Y_{caja}(\omega)$ . Esto se muestra en la figura 2.12.



**FIGURA 2.7.** El bloque Filtro, con respuesta en frecuencia  $G_{eq}(\omega)$ , procesa la señal proveniente de la pastilla, modificando su espectro y asemejándola lo máximo posible al sonido natural de la guitarra.



La respuesta en frecuencia del filtro ecualizador es inversa a la diferencia entre caja y pastilla  $G_{dif}(\omega)$ , y se calcula ya sea a partir de los autoespectros de la caja y pastilla, según:

$$G_{eq}(\omega) = \frac{1}{G_{dif}(\omega)} = \frac{G_c(\omega)}{G_{ps}(\omega)} = \frac{\frac{Y_{caja}(\omega)}{X_p(\omega)}}{\frac{Y_{pastilla}(\omega)}{X_p(\omega)}} = \frac{Y_{caja}(\omega)}{Y_{pastilla}(\omega)}$$

De la ecuación anterior, se puede deducir que, idealmente, el sonido natural de la guitarra puede obtenerse procesando la señal de la pastilla. Este procesamiento consiste en multiplicar en frecuencia el autoespectro de la pastilla  $Y_{pastilla}(\omega)$  (o también la respuesta en frecuencia de la misma  $G_{ps}(\omega)$ ) con la Función transferencia del filtro  $G_{eq}(\omega)$ . Como la multiplicación en el dominio de la frecuencia equivale a la convolución en el dominio de la frecuencia, entonces tenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} Y_{caja}(\omega) &= Y_{pastilla}(\omega) \times G_{eq}(\omega); & G_c(\omega) &= G_{ps}(\omega) \times G_{eq}(\omega) \\ y_{caja}(k) &= y_{pastilla}(k) * g_{eq}(n); & g_c(k) &= g_{ps}(k) * g_{eq}(n) \end{aligned}$$

Al lograr convertir  $y_{pastilla}(k)$  en  $y_{caja}(k)$ , realizando la convolución de la ecuación anterior, se habrá logrado que el sistema Pastilla, tenga la respuesta en frecuencia esperada, de la cual se habló en la sección 2.3.2.2.

Cabe añadir que si la señal de excitación  $X(\omega)$  que ingresa al puente es plana en el rango de frecuencias de interés (de 20 Hz a 10 kHz), se podrá estimar los cálculos de respuesta en frecuencia, con los valores de autoespectro medidos a la salida de cada bloque. Para que  $X(\omega)$  tenga una respuesta plana, es recomendable utilizar un actuador que genere ruido blanco, o un barrido sinusoidal. Como alternativa al actuador, se puede golpear el puente, generando una señal impulsiva, o pulsar las cuerdas en toda la tesitura (rango de frecuencias fundamentales de las notas, desde la más grave hasta la más aguda) del instrumento.

## 2.8. Diseño de filtros digitales

Los filtros digitales son utilizados en el procesamiento digital de audio, y están conformados por una serie de coeficientes y operaciones de adición, multiplicación y bloques de retardo ( $z^{-1}$ ); estos últimos mucho más fáciles de obtener en filtros digitales que en filtros analógicos [21]. Los filtros digitales pueden clasificarse en: Filtros IIR y filtros FIR.

**Filtros IIR.-** Se llaman así por sus siglas en inglés (*Infinite Impulse Response = Respuesta al Impulso Infinita*). La función transferencia de un filtro IIR de orden  $N+1$  es de la forma

$$H(z) = \frac{\sum_{n=0}^N b(n)z^{-n}}{\sum_{n=0}^N a(n)z^{-n}}$$

Los coeficientes del numerador son los ceros, y los del denominador, los polos de la ecuación [21]. Se muestra en la figura 2.8 el diagrama de bloques del filtro. La ventaja de los IIR es que, debido a que los valores a la salida dependen de los valores de entrada y además de valores anteriores de la salida, es más fácil conseguir una forma de respuesta en frecuencia determinada, con un orden bajo del filtro. Sin embargo, tiene como desventaja que el filtro puede tornarse inestable.

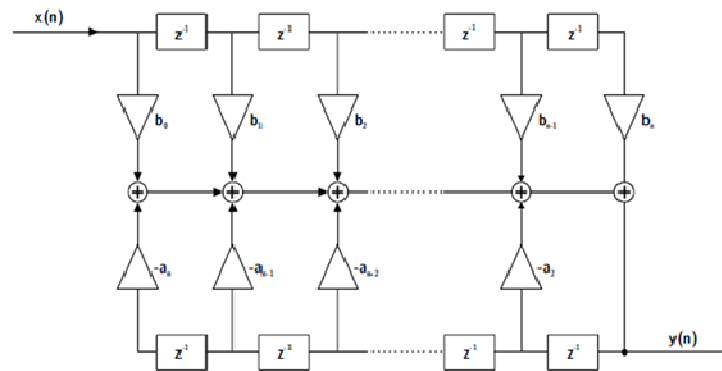


FIGURA 2.8. Diagrama de bloques de un filtro IIR. Fuente: (Vorländer, 2008).

**Filtros FIR.-** Por sus siglas en inglés (*Finite Impulse Response = Respuesta al Impulso finita*). Se diferencia del IIR en que todos los polos con igualados a 1 ( $a(n) = 1$ ), es decir, el filtro FIR consiste únicamente de un arreglo de coeficientes de la forma

$$H(z) = \frac{\sum_{n=0}^N b(n)z^{-n}}{\sum_{n=0}^N a(n)z^{-n}}$$

Para un filtro FIR de orden  $N+1$ . Se muestra el diagrama de bloques en la figura 2.9. Dado que en un filtro FIR, la salida depende únicamente de la entrada, el filtro FIR requiere de un mayor orden para tener mayor precisión en la respuesta en frecuencia. Sin embargo, a diferencia del IIR, su respuesta es más estable.

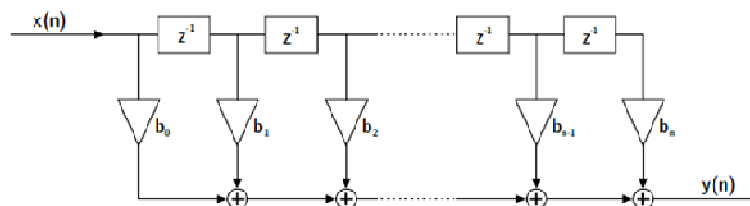


FIGURA 2.9. Diagrama de bloques de un filtro FIR. Fuente: (Vorländer, 2008).

### 3. PRUEBAS Y MEDICIONES

#### 3.1. Objetivos de las mediciones

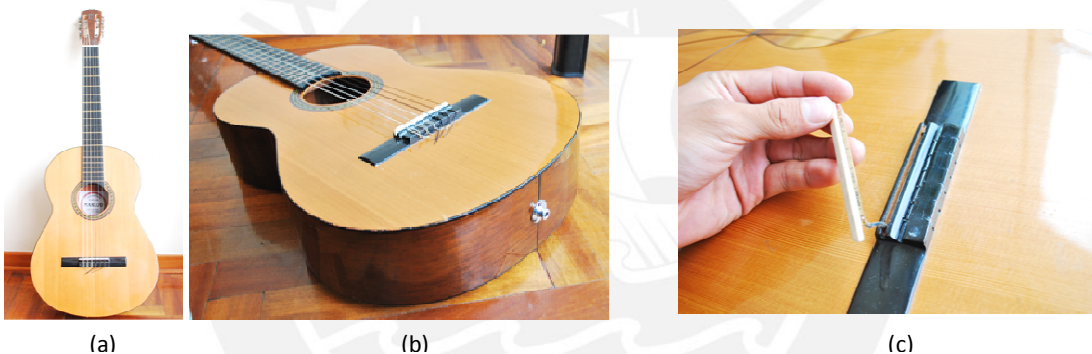
Los objetivos de las mediciones de laboratorio están alineados a los objetivos de la tesis. Dichos objetivos se enuncian a continuación:

- a. **Encontrar la respuesta en frecuencia de la pastilla piezoeléctrica.-** Para conocer la respuesta en frecuencia de la pastilla piezoeléctrica, es necesario medirla sin carga, es decir, desmontada de su lugar de funcionamiento habitual en el puente de la guitarra.
- b. **Analizar las características de la influencia de la pastilla en el sonido de la guitarra.-** Para lograr este objetivo, es necesario conocer la respuesta en frecuencia de la caja acústica (ante una excitación con energía en todo el rango de frecuencias), y también la respuesta de la pastilla montada en el puente de la guitarra (ante la misma señal de excitación). Teniendo ambas mediciones, se podrá identificar aquellas regiones en las que la pastilla influye, alterando el timbre natural de la guitarra.
- c. **Encontrar la función transferencia del filtro ecualizador que corrige la señal de la pastilla.-** Este filtro, como se vio en el punto 2.7.2, se obtiene con las mediciones de respuesta en frecuencia (o autoespectro) de la caja acústica y la pastilla colocada en el puente.

### 3.2. Herramientas, instrumentos y equipos utilizados

**Guitarra Electroacústica.-** Se utilizó como objeto de las mediciones una guitarra clásica con cuerdas de nylon marca “Marujo” (Ver Figura 3.1.a y b), cuyo sonido natural es bastante bueno, con una buena presencia de las resonancias de baja frecuencia. Esto alienta el éxito de la investigación ya que el procesamiento de la señal de la pastilla con el Filtro Digital apuntará al sonido proveniente de una buena guitarra.

**Pastilla piezoeléctrica.-** La pastilla utilizada de la marca ARTEC—que se muestra en la Figura 3.1.c- es, a diferencia de la guitarra, una pastilla de calidad media. Cabe mencionar además, que la guitarra utilizada no posee ninguna etapa de pre amplificación ni ecualización, que suelen mejorar en cierta medida la señal a la salida de la pastilla. Por tanto, el sonido de la guitarra amplificada por la pastilla, se oye muy artificial y sin cuerpo..



**FIGURA 3.1.** a,b) Guitarra Electroacústica. Marca: Marujo (Nacional). c) Pastilla piezoeléctrica marca ARTEC.

**Analizador de señales.-** Como elemento central para las mediciones de laboratorio, se utilizó el analizador de señales de audio, marca Brüel & Kjaer, modelo PULSE - 3560C (El documento con especificaciones técnicas se adjunta en el Anexo 1 [19]). Este equipo posee cuatro canales de entrada/salida para el muestreo y generación simultánea de señales, entre las que tenemos: la señal de la pastilla, micrófonos, actuador, sensor de fuerza y velocímetro láser. El analizador, en conjunto con una computadora corriente, realiza el procesamiento de las señales muestreadas (entradas), para entregar los datos convenientes como autoespectro, función transferencia y coherencia. Durante las mediciones, el equipo se maneja íntegramente con ayuda de una computadora portátil que está corriendo el Software PULSE, creado por el fabricante del equipo.

**Micrófonos.-** Para el muestreo de la señal natural de la guitarra se utilizó micrófonos Brüel & Kjaer modelo 4189. Estos micrófonos son de condensador, y su respuesta en frecuencia es plana en el rango de frecuencias de 6.5 Hz – 20 kHz. Otras prestaciones como la sensibilidad y rango dinámico se encuentran en el documento de especificaciones técnicas que Se adjunta en el Anexo 1 [19].

**Sensor Láser de Velocidad (Velocímetro Láser).-** El sensor de velocidad láser por efecto Doppler se utilizó en las mediciones con el método del actuador con la finalidad de comparar los datos obtenidos con la pastilla, y verificar si los mismos están relacionados, dada la respuesta en frecuencia de la caja acústica y de la pastilla. Al derivar los datos obtenidos de la velocidad con respecto al tiempo, se obtiene la aceleración en el puente; y ya que la pastilla entrega un voltaje proporcional a la aceleración (ver sección 2.4) medida justamente entre el puente y las cuerdas, ambas gráficas deberían ser parecidas. El velocímetro utilizado es de marca Brüel & Kjaer, modelo: OMETRON VH-1000 D (Se adjunta especificaciones técnicas en el Anexo 1 [19].

**Actuador.-** Se utilizó un actuador marca Brüel & Kjaer, Tipo 4810 (Se adjunta especificaciones técnicas en el Anexo 1 [19]), para excitar el puente con ruido blanco. De esta manera, se asegura que la señal de entrada al puente sea uniforme en su magnitud en el rango de frecuencias de interés. Para fijar el actuador al puente se utilizó un huesillo con un ángulo de metal adaptado (Figura 3.3.b), sobre el cual se enroscó la aguja que transmitía la señal del actuador. Se muestra el montaje en la Figura 3.3.c)

**Amplificador.-** Utilizado para amplificar el ruido blanco que ingresa al actuador. Se utilizó un amplificador marca CROWN, modelo XTi2000, de 1225 Watts. Se adjunta especificaciones técnicas en el Anexo 1 [22].

**Sensor de fuerza:** Marca Brüel & Kjaer, Modelo: 8200 (se adjunta hoja técnica en el Anexo 1 [23]). Este sensor de fuerza se utilizó para medir la señal de excitación que el actuador transmitía al puente.

**Accesorios Adicionales.-** Se utilizó una computadora portátil, con el programa PULSE instalado, para manejar el Analizador de Señales. Dentro de los accesorios adicionales también se encuentran cables coaxiales (que protegen las señales del ruido) con los adaptadores correspondientes, parantes para micro, y esponjas para aislar la guitarra de su plataforma de apoyo.

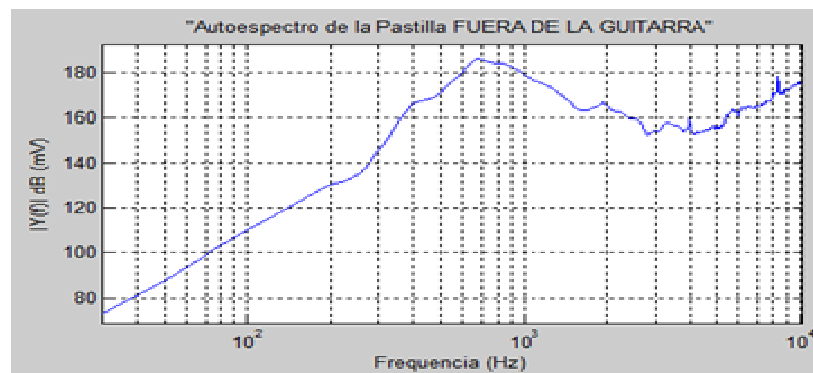
### 3.3. Respuesta de la pastilla fuera de la guitarra

Conocer la forma de la respuesta de frecuencia de la pastilla piezoeléctrica propiamente dicha (es decir, no montada bajo el puente de la guitarra, sino fuera de ésta) ayudará al correcto análisis de las futuras mediciones, en las que se comparará la respuesta de la caja acústica y de la pastilla ante una misma señal de entrada en el puente de la guitarra. La diferencia que se espera obtener entre la caja y la pastilla en dichas futuras mediciones debería estar relacionada con la magnitud de la respuesta en frecuencia de la pastilla, que por lo general no es plana, sino que muestra picos de resonancia.

Para realizar esta medición, se desmontó la pastilla, como se aprecia en la Figura 3.2.a, y se excitó a la misma golpeándola con un martillo varias veces. Dado que el martillo no poseía un sensor de fuerza que pudiera medir la intensidad del golpe (señal de entrada), no fue posible obtener la respuesta en frecuencia del transductor. Sin embargo, asumiendo que el golpe posee una amplitud constante en el rango de frecuencias de interés, se obtuvo el autoespectro de la pastilla, mostrado en la figura 3.2.b. El código en Matlab para la generación de todas las gráficas mostradas en el presente documento, se adjunta en el Anexo 2, del mismo modo que las gráficas y datos generados con el software PULSE.



(a)



(b)

**FIGURA 3.2.** a) La pastilla piezoeléctrica fuera de la guitarra, siendo excitada con un golpe.

b) Autoespectro de la pastilla fuera de la guitarra.



Se puede apreciar en la gráfica del autoespectro que la respuesta de la pastilla actúa como un filtro pasa altos, con una gran atenuación en bajas frecuencias. Asimismo, la pastilla presenta una resonancia, cuyo valor pico está alrededor de los 675 Hz, lo cual es un valor muy alto dada la tesitura del instrumento (de los 82.41 Hz hasta los 987.76 Hz). En efecto, se observa que alrededor de los 100 Hz (donde se espera la resonancia de Helmholtz), la atenuación es de unos 70 dB con respecto al pico en 675 Hz. Asimismo, en 200 Hz, donde se espera el primer modo de la tapa frontal, hay una atenuación de alrededor de 30 dB.

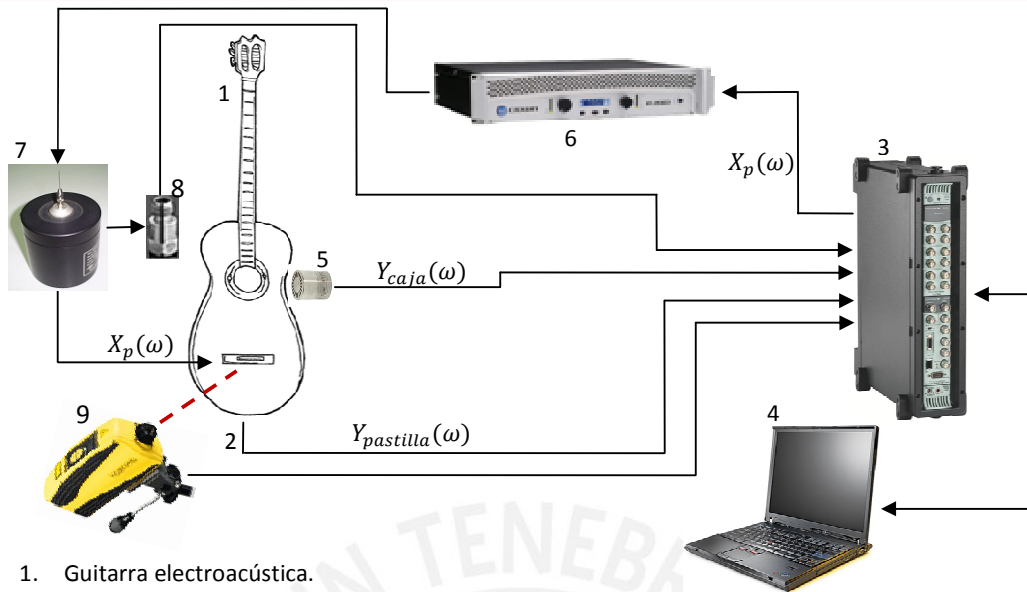
### **3.4. Respuesta de la caja y la pastilla**

#### **3.4.1. Conceptos generales para la medición**

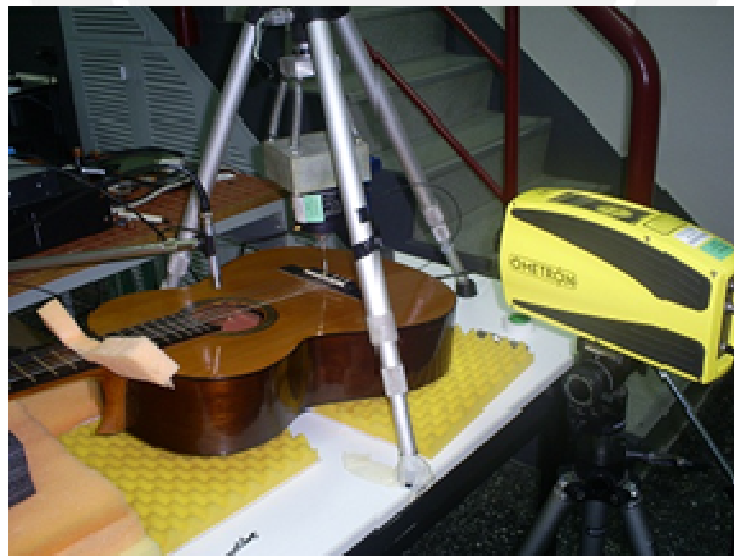
Para obtener la respuesta tanto de la caja acústica como de la pastilla (montada sobre el puente, debajo del huesillo) ante la señal excitadora en el puente, existen diversos métodos. En la bibliografía [10] se pone énfasis en dos formas de excitar el puente de la guitarra con una señal de amplitud constante en el rango de frecuencias de interés: i) El método del martillo, que consiste en golpear una cantidad de veces el huesillo (con las cuerdas colocadas y tapadas por una esponja, para evitar vibraciones no deseadas); ii) El método del rasgueo natural, que consiste en pulsar las seis cuerdas en simultáneo para cada uno de los trastes de la guitarra, con una intensidad uniforme. El presente trabajo propone un tercer método para excitar el puente: iii) El método del actuador, el cual consiste en excitar el puente con ruido blanco proveniente de un actuador (el cual es a su vez controlado por el analizador de señales).

Las mediciones con los métodos descritos se exponen en las secciones 3.4.2, hasta 3.4.4. La figura 3.3 muestra un esquema con la disposición genérica de los instrumentos y equipos de laboratorio para la realización de las mediciones, así como una fotografía de este montaje (se adjuntan fotografías adicionales de las mediciones de laboratorio en el anexo 4). El esquema de la figura es general, y en él se muestra la conexión de todos los instrumentos utilizados; debido a limitaciones del analizador de señales (sólo posee cuatro canales de entrada), y a la diferencia entre los métodos de medición aplicados, sólo se utiliza ciertos elementos del esquema en cada medición particular.





(a)



(b)

**FIGURA 3.3.** Disposición de los equipos e instrumentos de medición. a) Esquema del montaje de instrumentos y conexiones. b) Fotografía del montaje en el laboratorio.

### 3.4.2. Medición con el método del martillo

Como se indicó en la sección 3.4.1, el método del martillo consiste en excitar el puente de la guitarra golpeando el huesillo con un martillo [10]. Este martillo debe ser de un material rígido, de modo que el golpe genere energía uniforme en todo el ancho de banda de interés (de 20Hz a 10 kHz). La señal de entrada entonces, es una función aproximada a la función impulso o Delta de Dirac. Una limitación de este método es que no se puede asegurar que la energía de la señal de entrada sea exactamente la misma en todo el rango de frecuencias, ya que la señal de excitación no es generada por un generador de señales, sino que está sujeta al error humano. Asimismo, no se dispone de un sensor de fuerza que pueda ser montado en el martillo, por lo que no es posible medir la señal con que el puente es excitado. Sin embargo, la ventaja de este método es la facilidad del montaje. Sólo se requiere tapar las cuerdas con una esponja (para evitar que la vibración de las mismas añada mayor energía en ciertas frecuencias particulares), y medir: i) Con un micrófono la señal proveniente de la boca de la guitarra, y ii) con un cable de línea, la señal a la salida de la pastilla. La figura 3.4 muestra los resultados obtenidos con el método del martillo.

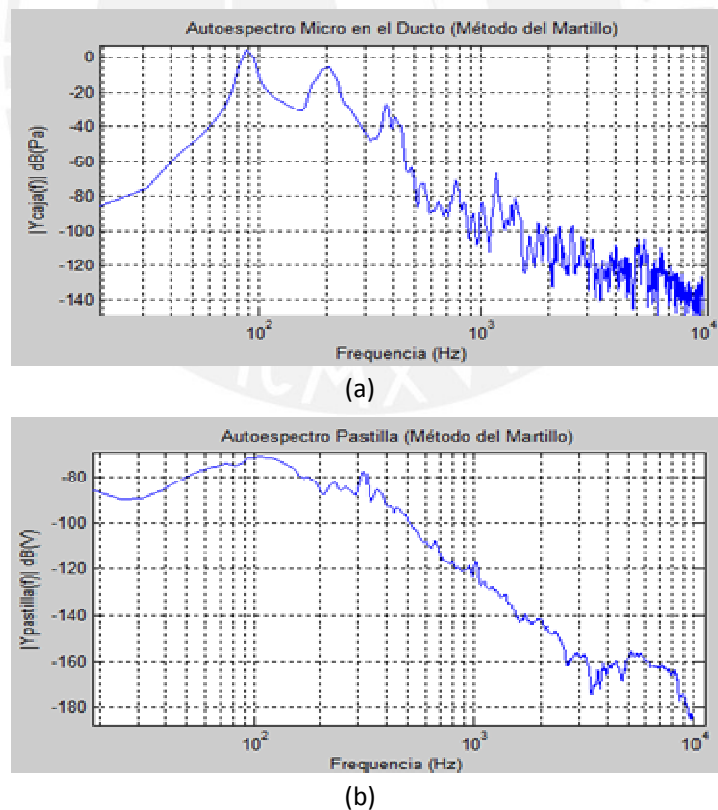


FIGURA 3.4. Método del martillo. a) Autoespectro de la caja acústica. b) Autoespectro de la Pastilla.

En la figura anterior se muestran los autoespectros tanto de la caja acústica, como de la pastilla piezoeléctrica. Como se mencionó en la sección 2.5, los autoespectros con una aproximación cercana a la respuesta en frecuencia de ambos sistemas (caja y pastilla), asumiendo que la excitación del martillo tiene amplitud constante en todas las frecuencias de interés.

Se observa en el autoespectro de la caja acústica, la presencia de las dos resonancias en bajas frecuencias, las cuales están, para la guitarra particular del experimento, en 87.5 Hz y 193.8 Hz respectivamente. La primera resonancia (resonancia de Helmholtz) está 8 dB por encima de la segunda (primer modo de la tapa frontal), lo cual no se espera, ya que típicamente el segundo modo posee mayor energía que el primero (ver figura 2.4). La superioridad del primer modo puede ocurrir debido a dos motivos: i) La guitarra usada en el experimento es atípica, y la tapa frontal no es lo suficientemente resonante; o ii) La señal de excitación no es uniforme en todas las frecuencias, con mayor energía en bajas frecuencias.

Al observar el autoespectro de la pastilla, es clara la atenuación en bajas frecuencias, en la que las resonancias no están bien diferenciadas. Asimismo, las frecuencias cercanas a los 675 Hz (que según la sección 3.3, es la frecuencia de resonancia de la pastilla) presentan un incremento con respecto al autoespectro de la caja. Esto muestra que la pastilla, como se esperaba y de acuerdo a su respuesta en frecuencia, modifica la señal de la guitarra atenuando las bajas frecuencias (de 20 Hz a 300 Hz) y amplifica excesivamente las medias frecuencias, teniendo como punto de mayor ganancia la resonancia en 675 Hz.

Del cociente de ambos autoespectros resulta la magnitud de la función transferencia del filtro ecualizador, la cual se muestra en la figura 3.5. Dado que el propósito del filtro es

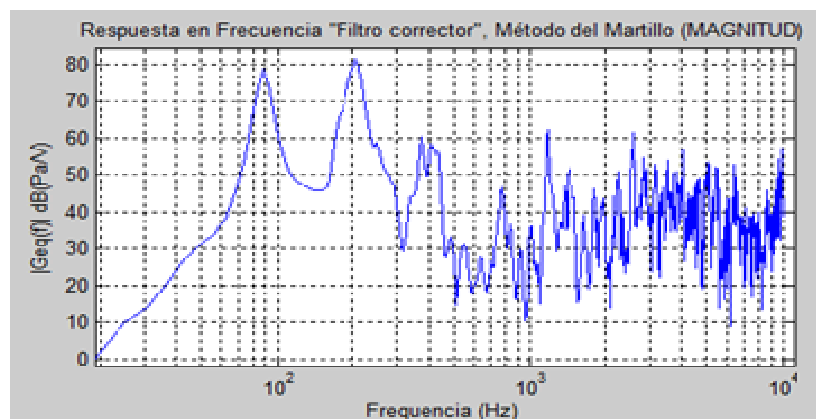
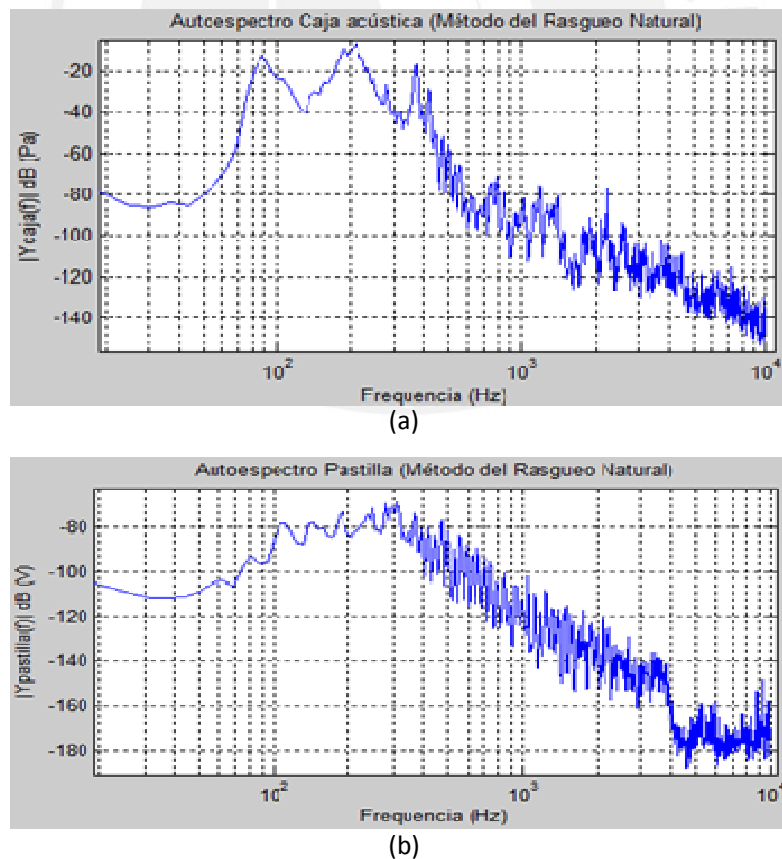


FIGURA 3.5. Magnitud del filtro ecualizador, obtenida con el método del martillo.

contrarrestar el efecto de la pastilla en el timbre de la guitarra, lo que se espera de su función transferencia es una gran amplificación en las bajas frecuencias, seguida de una gran atenuación de las frecuencias cercanas a la resonancia de la pastilla en 675 Hz, y una atenuación leve en las altas frecuencias. En efecto, eso es justamente lo que se observa en la figura 3.5, con dos picos de gran magnitud en 87.5 y 193 Hz; se aprecia también una atenuación que permanece casi constante entre los 450 y 700 Hz, cuyo nivel promedio es de 65 dB menor que el de los dos picos en bajas frecuencias.

### 3.4.3. Medición con el método del rasgueo natural

Este método, según la bibliografía revisada [10] ofrece resultados más reales y confiables que los obtenidos con el método del martillo. Esto se debe a que la señal que excita el puente es la misma que en un escenario real de interpretación. Sin embargo, existe un grado de imprecisión debido a que el “barrido de notas” no es uniforme en todas las frecuencias. La figura 3.6 muestra los resultados medidos con este método.

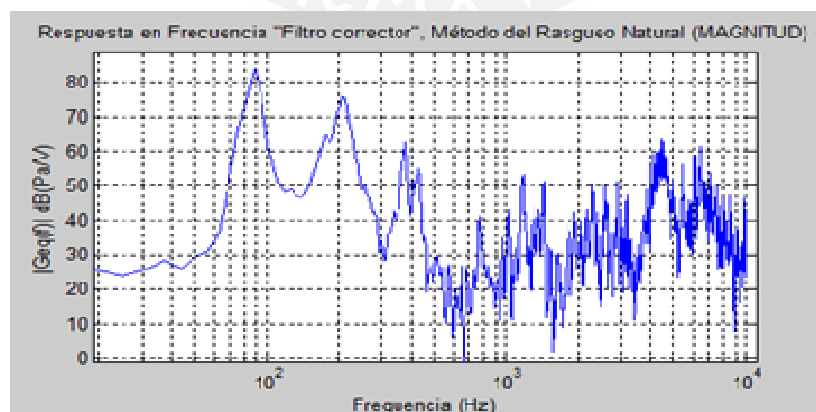


**FIGURA 3.6.** Método del rasgueo natural. a) Autoespectro de la caja acústica. b) Autoespectro de la pastilla.

En la figura 3.6.a, se puede apreciar que el autoespectro de la caja acústica tiene básicamente la misma forma que el medido con el método del martillo. La única diferencia apreciable en este caso, es que en esta gráfica, la primera resonancia supera a la segunda en 3dB, lo cual es más cercano a la respuesta típica de la caja. Asimismo, se aprecia que la segunda resonancia presenta en realidad dos picos, a 187.5 Hz y 212.5 Hz. Estos dos picos pertenecen a la frecuencia fundamental de dos notas pulsadas en la guitarra, que al no coincidir exactamente con la resonancia de la caja, no logran excitar dicha resonancia a su máxima amplitud, formándose dos picos de amplitud alrededor de la misma. De esta manera se muestra una de las desventajas del método del rasgueo natural: no poseer niveles de energía uniformes en todo el rango de frecuencias, sino picos de amplitud según la fundamental y armónicos de cada nota pulsada.

La gráfica de autoespectro de la pastilla, por otro lado, está más acorde a lo esperado, ya que presenta menores niveles en las bajas frecuencias, y niveles más elevados alrededor de su resonancia en 675 Hz. El autoespectro de la pastilla arroja un punto de máxima amplitud alrededor de los 300 Hz.

En base a los autoespectros mostrados, se obtiene la magnitud de la función transferencia del filtro ecualizador, hallada según el método del rasgueo natural. Se muestra dicha gráfica en la figura 3.7. En ella se aprecia básicamente la misma respuesta que la del filtro hallado con el método del martillo, con dos picos de resonancia en 187.5 Hz, y en 206.3 Hz, aunque en el segundo pico, se sigue apreciando la presencia de dos picos de resonancia dispersos alrededor de una resonancia central, como se vio en la figura 3.6.a.



**FIGURA 3.7.** Magnitud del filtro ecualizador, obtenida con el método del rasgueo natural.



#### 3.4.4. Medición con el método del actuador

La ventaja del método del actuador con respecto a los dos realizados anteriormente es que, al contar con un sensor de fuerza que se puede colocar en el actuador, es posible muestrear la señal de entrada al puente ( $X_p(\omega)$  según la sección 2.7), lo cual no se pudo hacer con los métodos del martillo y del rasqueo natural. Como consecuencia, al tener la señal de entrada, es posible trabajar con valores de respuesta en frecuencia (magnitud y fase de la caja y la pastilla, teniendo como señal de entrada la señal del actuador), en lugar de autoespectros (cuyo valor es sólo una aproximación a la magnitud de la respuesta en frecuencia). Otra ventaja de esto es que, dada la respuesta en frecuencia plana del actuador y amplificador, y la precisión de el generador de la señal de excitación (ver figura 3.3.b), se asegura con exactitud una amplitud uniforme en la señal de excitación en el puente para el rango de frecuencias de interés, cosa que no podía asegurarse con exactitud al golpear el puente con un martillo o pulsar las cuerdas de la guitarra.

Para lograr la conexión eficiente entre el actuador y el puente de la guitarra utilizó un huesillo preparado para tal fin (figura 3.8.a). Este es un huesillo común con un corchete (ángulo) de metal muy pequeño atornillado en la parte del huesillo que sobresale cuando este está montado en el puente. Sobre el corchete se entornilló el porta brocas o *shunt*, donde se atornilló la aguja que transmite la señal del actuador. En la figura 3.8.b se muestra el montaje del huesillo que acopla el actuador a la guitarra.



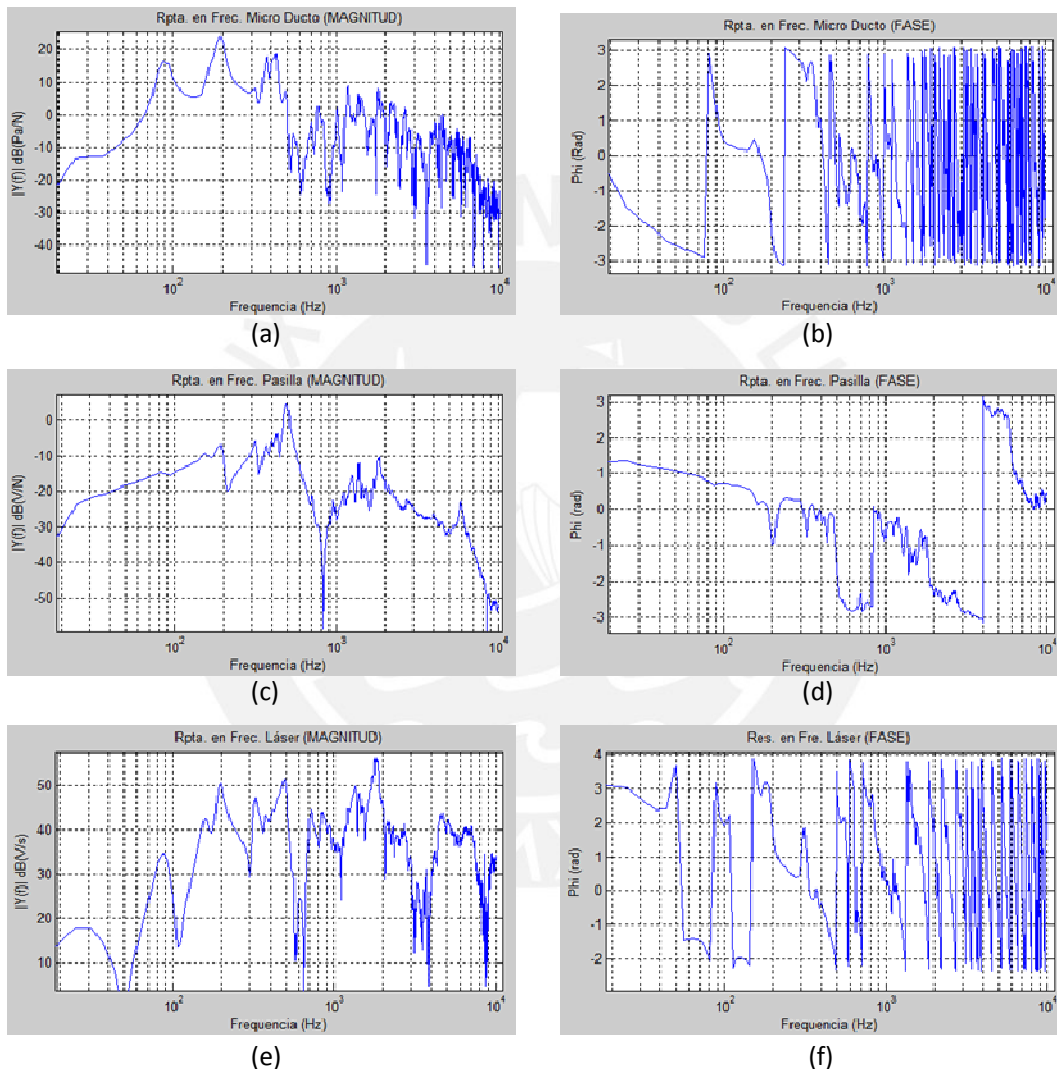
(a)



(b)

**FIGURA 3.8.** a) Huesillo adaptado para conectarse con el actuador. b) Acoplamiento del actuador a la guitarra

La medición se realizó excitando el puente con ruido blanco desde el actuador, por un tiempo de diez segundos, tiempo suficiente para que los datos medidos con el sensor de fuerza en el actuador, el micrófono, la pastilla y el velocímetro láser se estabilicen para formar una gráfica de respuesta en frecuencia promedio. Las gráficas obtenidas se muestran en la figura 3.9.



**FIGURA 3.9.** Respuesta en Frecuencia con el método del actuador (Magnitud y Fase). a,b) La caja acústica. c,d) La pastilla. e,f) Aceleración del puente (medida con el velocímetro).

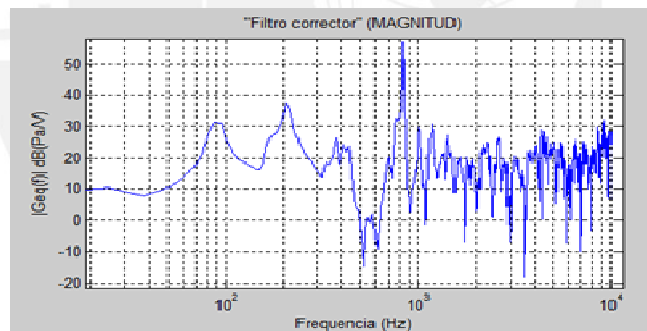
Las gráficas de la figura 3.9 presentan resultados más precisos con respecto a los obtenidos con los dos métodos anteriores. Esto se aprecia sobre todo en la figura 3.9.c, la gráfica de magnitud de la respuesta de la pastilla. En dicho gráfico, las dos resonancias iniciales están presentes (a 87.5 y 193.8 Hz), pero su amplitud es modulada de acuerdo a la



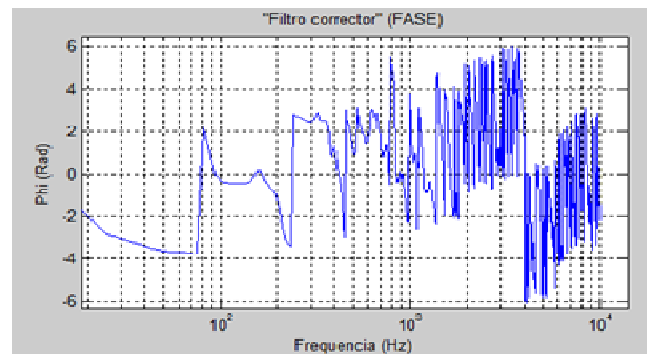
forma de la respuesta de la pastilla (ver figura 3.2.b), con una pendiente creciente en bajas frecuencias. Asimismo, la resonancia de la caja acústica presente alrededor de los 500 Hz (figura 3.9.a) está sobreamplificada en la gráfica de la pastilla (por estar cerca de la resonancia del transductor en 675 Hz), llegando a ser el punto de máxima amplitud. Luego de la frecuencia de resonancia de la pastilla, la magnitud de su respuesta en frecuencia decae, como es esperado.

La gráfica de aceleración del puente (figura 3.9.d) es obtenida a partir de la derivada temporal de los datos muestreados por el velocímetro láser (en el dominio de la frecuencia, la derivada se obtiene multiplicando la magnitud por el valor de frecuencia angular, que equivale a pasar la señal por un filtro pasa altos). Esta gráfica arroja la gráfica que mostraría la pastilla si fuera de respuesta plana. Se aprecia que, aun cuando la respuesta de la pastilla fuera ideal es decir, plana), la primera resonancia no es captada con suficiente intensidad en el puente de la guitarra.

La magnitud y fase del filtro ecualizador, obtenidas con el método del actuador, se muestran en la figura 3.10. Se aprecia un pico elevado en la gráfica de la magnitud, en 831.3 Hz. Esto



(a)

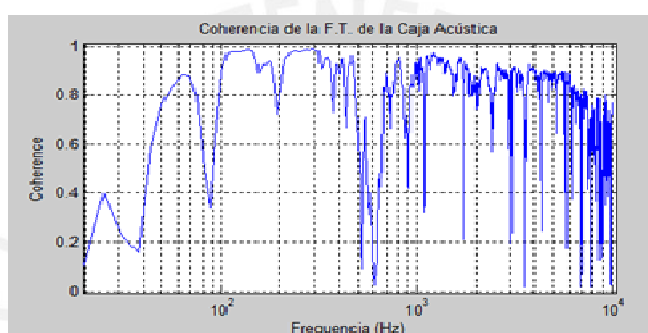


(b)

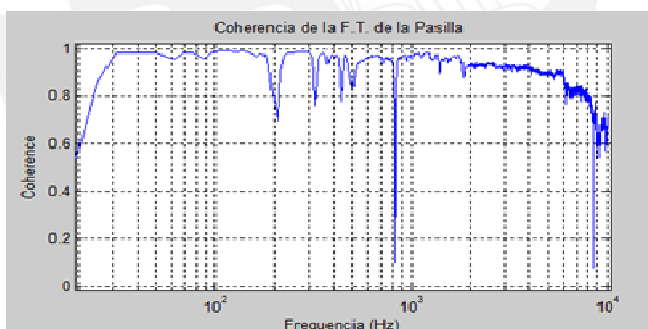
**FIGURA 3.10.** a) Magnitud y b) fase del filtro ecualizador, obtenida con el método del actuador.

es porque la magnitud de la respuesta de la pastilla es muy pequeña en esa frecuencia. Para efectos del desarrollo del filtro, esta amplitud será corregida, y promediada con los valores de frecuencias cercanos (entre 750 y 950 Hz).

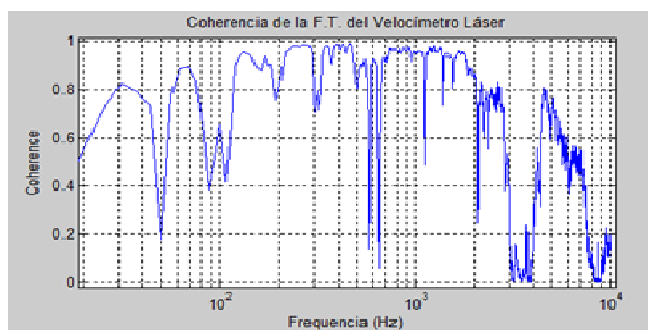
**Gráficos de coherencia obtenidos con el método del actuador.-** Al tener información de las señales de salida (micrófono en la boca de guitarra, pastilla y velocímetro láser) y la señal de entrada (sensor de fuerza en el actuador), se puede calcular la coherencia entre dichas señales, para cada respuesta en frecuencia. Se muestra en la figura 3.11, las gráficas de coherencia. Como es esperado, los valores de coherencia son cercanos a 1,



(a)



(b)



(c)

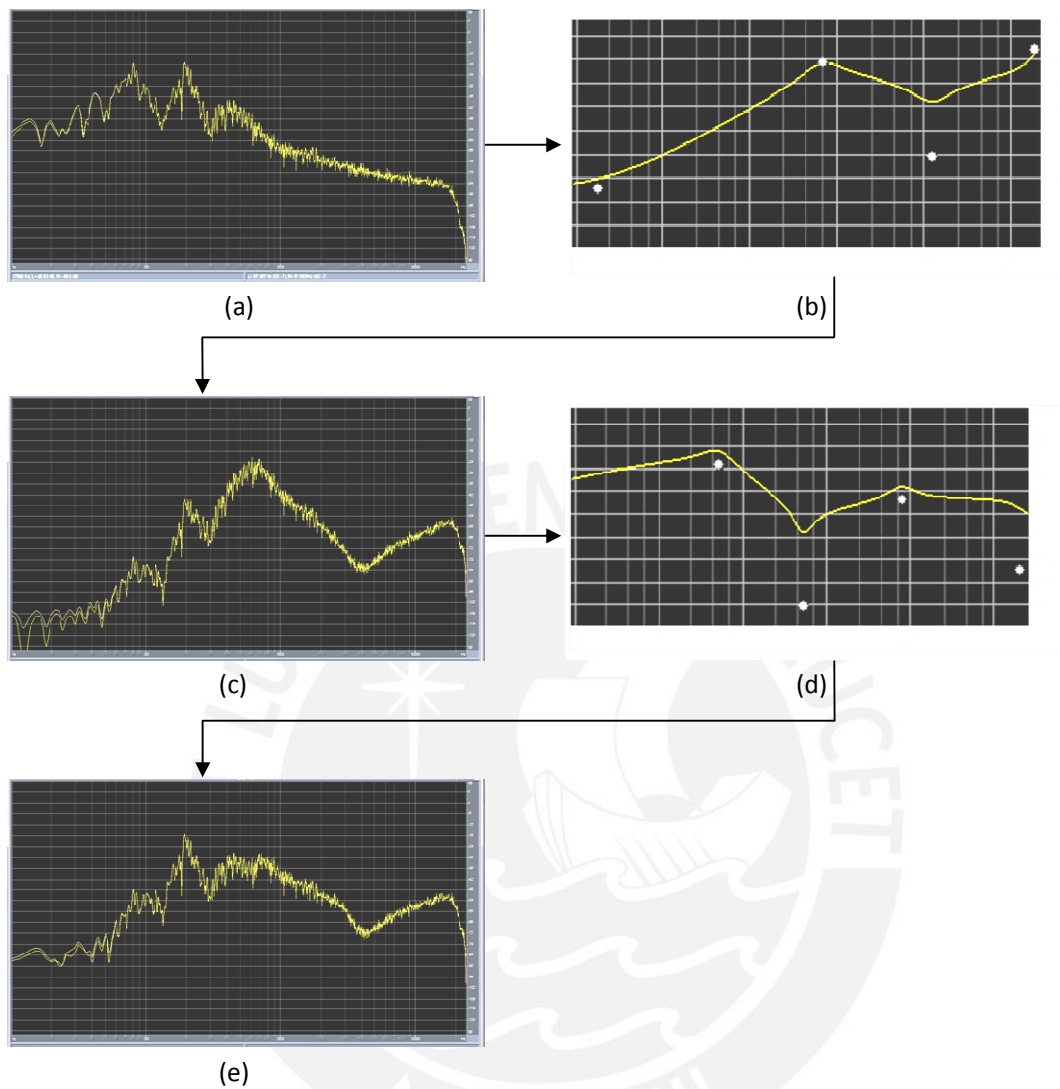
**FIGURA 3.11.** Coherencia de la Respuesta en Frecuencia medida con el método del actuador a) Caja acústica. b) Pastilla piezoeléctrica. c) Velocímetro Láser.

sobre todo en el caso de la pastilla. En el caso de la caja y el velocímetro, se observan regiones de coherencia baja. La más apreciable e importante está para ambos casos en la primera resonancia, donde la coherencia decae hasta un valor de alrededor de 0.4. Sin embargo, como se vio en la sección 2.5, esto no significa que los valores en esa región sean inválidos, sino que sería más conveniente tomar una mayor cantidad de promedios para lograr una mejor coherencia.

### **3.5. Procesamiento de la señal de la pastilla usando filtros digitales**

#### **3.5.1. Ecualización práctica con ecualizador de tres bandas**

Aunque no se ha mencionado previamente en el presente documento, las guitarras electroacústicas suelen poseer un ecualizador de tres bandas, con rango de -12 dB a +12 dB. Este ecualizador se utiliza como etapa inmediata a la salida de la pastilla. Dado que la corrección del sonido de la guitarra electroacústica se realiza aplicando un filtro con respuesta en frecuencia como se muestra en la figura 3.10(a), una aproximación práctica es posible utilizando el ecualizador de tres bandas mencionado, en caso se cuente con el mismo. La ecualización debe consistir en amplificar en gran medida la banda de bajas frecuencias (típicamente alrededor de los 150 Hz), atenuar en gran medida la banda de medias frecuencias (alrededor de los 500 Hz) y mantener un nivel intermedio en las altas frecuencias (alrededor de los 3000 Hz). Esta ecualización, aunque no es del todo precisa, compensa en gran medida el sonido alterado por la pastilla, devolviéndole en cierta medida la predominancia de las dos resonancias en bajas frecuencias. Se muestra una simulación de dicho procedimiento en las gráficas de la figura 3.12.



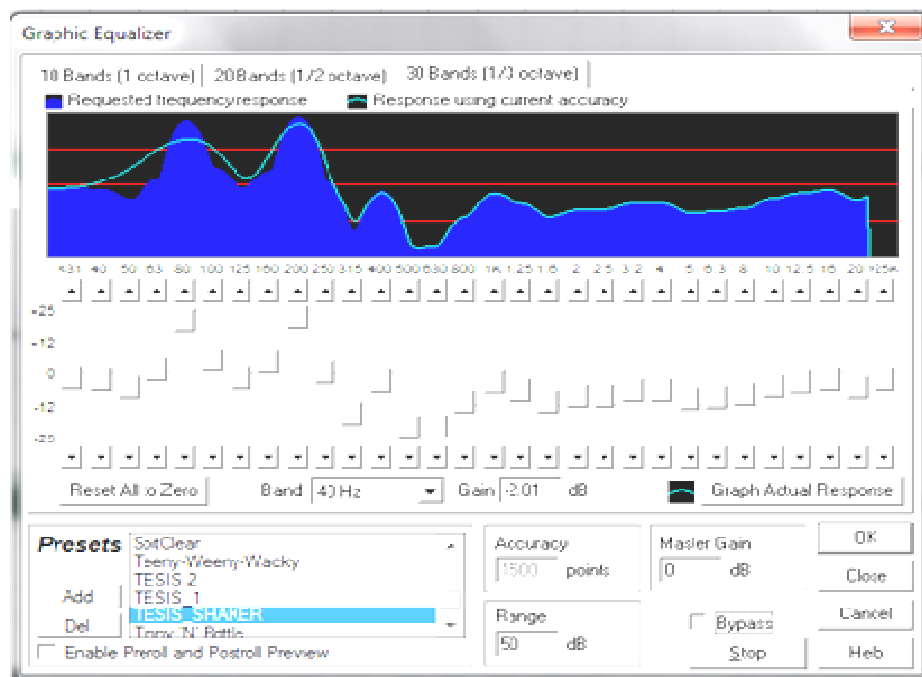
**FIGURA 3.12.** Ecuación práctica de la guitarra electroacústica usando un ecualizador de tres bandas incorporado a la guitarra. (a) Respuesta natural de la guitarra. (b) Respuesta típica de la pastilla piezoeléctrica. (c) Respuesta de la guitarra alterada por la pastilla. (d) Configuración correcta del ecualizador de tres bandas. (e) Respuesta de la guitarra corregida por el ecualizador de tres bandas.

### 3.5.2. Ecuación con software editor de audio

En base a los resultados obtenidos de la respuesta en frecuencia del filtro ecualizador en la sección 3.4, se debe ecualizar la señal proveniente de la pastilla con un filtro cuya respuesta en frecuencia se aproxime lo mejor posible a la respuesta obtenida de las mediciones. Se planteó dos formas de realizar este procesamiento de la señal: i) Usando un filtro disponible en un software editor de audio; ii) desarrollando un filtro digital en simulación, usando un

software científico. Esta sección trata acerca de la primera opción, mientras que la siguiente sección (3.5.2) aborda la segunda opción.

Se escogió utilizar el software Adobe Audition versión 1.5, debido a que cuenta con un ecualizador gráfico muy completo, que permite controlar los parámetros del ecualizador gráfico (10 - 30 bandas, orden del filtro y rango dinámico). Se muestra en la figura 3.12 el filtro configurado para ecualizar una pieza musical grabada con la guitarra utilizada en las



**FIGURA 3.12.** Filtro generado con Adobe Audition 1.5. Se empleó la herramienta “ecualizador gráfico”, usando para el filtro 30 bandas de ecualización, rango dinámico de 50 dB y un orden de 1500 coeficientes.

mediciones. Se utilizó como respuesta de frecuencia modelo, la hallada con el método del actuador (figura 3.10.a). A fin de cumplir con los requerimientos de la respuesta en frecuencia deseada, se procesó la canción en Adobe Audition 1.5, con un ecualizador gráfico de 30 bandas, rango dinámico de 50 dB y orden del filtro de 1500 puntos. Se aprecia en la figura 3.12, que la respuesta en frecuencia real obtenida (mostrada con una línea) es muy cercana a la deseada (figura 3.10.a). En efecto, luego de procesar la canción y escucharla, se percibe una mayor naturalidad en el sonido del instrumento, y una notable mejora en comparación a la canción sin ecualizar. Se adjunta en el CD-ROM el audio correspondiente a la canción sin ecualizar, y el audio de la señal procesada, tanto por el ecualizador gráfico de Adobe Audition, como por los filtros desarrollados con Matlab, descritos a continuación, en la sección 3.5.2).

### 3.5.3. Desarrollo del filtro ecualizador digital en Matlab

Para el procesamiento de la señal mediante software científico, se utilizó el software Matlab, por poseer herramientas y comandos para el diseño tanto de filtros FIR como IIR. Se escogió trabajar con filtros FIR, debido a la mayor estabilidad de su respuesta al impulso. Debido a que se trabaja con filtros FIR, el orden del filtro ecualizador desarrollado será alto. Sin embargo, por tratarse de software de simulación, y no de tiempo real, esto no presentó problemas en el procesamiento.

**Comandos de Matlab para el desarrollo de un filtro FIR.-** Matlab posee funciones que entregan como salida un vector que contiene los coeficientes  $b(n)$  del filtro FIR de orden  $N$ , cuya magnitud de respuesta de frecuencia deseada debe señalarse a la entrada de la función. Dichas funciones son:

- a) **FIR1.-** Desarrolla un filtro FIR pasa bajos y pasa banda, empleando el método de ventanas.
- b) **FIR2.-** Filtro FIR de orden  $N$  y de forma arbitraria, utilizando el método de muestreo en frecuencia.
- c) **FIRCL.-** Filtro FIR de fase lineal, con el método de mínimos cuadrados limitado (en inglés *constrained least squares*).
- d) **FIRCLS1.-** Usando el mismo método que FIRCL, pero para filtros pasa bajos y pasa bajos.
- e) **FIRLS.-** Filtro FIR de fase lineal minimización del error con el método de mínimos cuadrados.

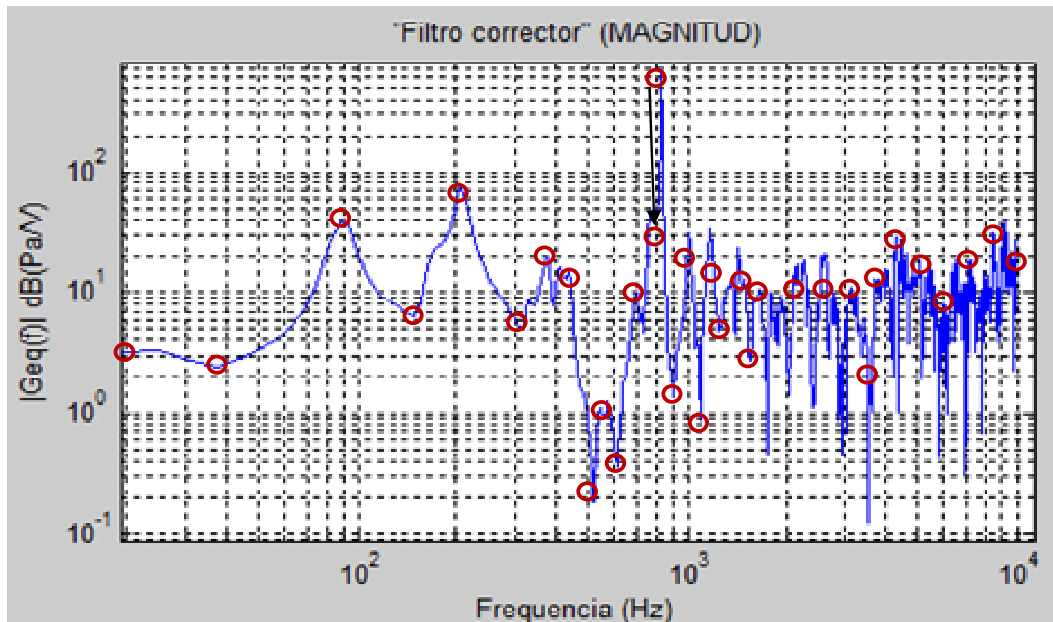
De las funciones descritas, la que más se adecua a los requerimientos del filtro ecualizador para la guitarra es la función "FIR2", ya que permite dar forma libre a la respuesta en frecuencia del filtro, sin ningún tipo de restricción, como por ejemplo, la fase. Esta función se utiliza con la notación:

$$B = \text{FIR2}(N, F, A);$$

- Donde:
- $N$ : Orden del filtro;
  - $F$ : Vector con los valores de frecuencia referenciales donde se desea controlar la magnitud (valor entre 0 y 1).
  - $A$ : Vector de amplitudes correspondientes a las frecuencias del vector  $F$ .



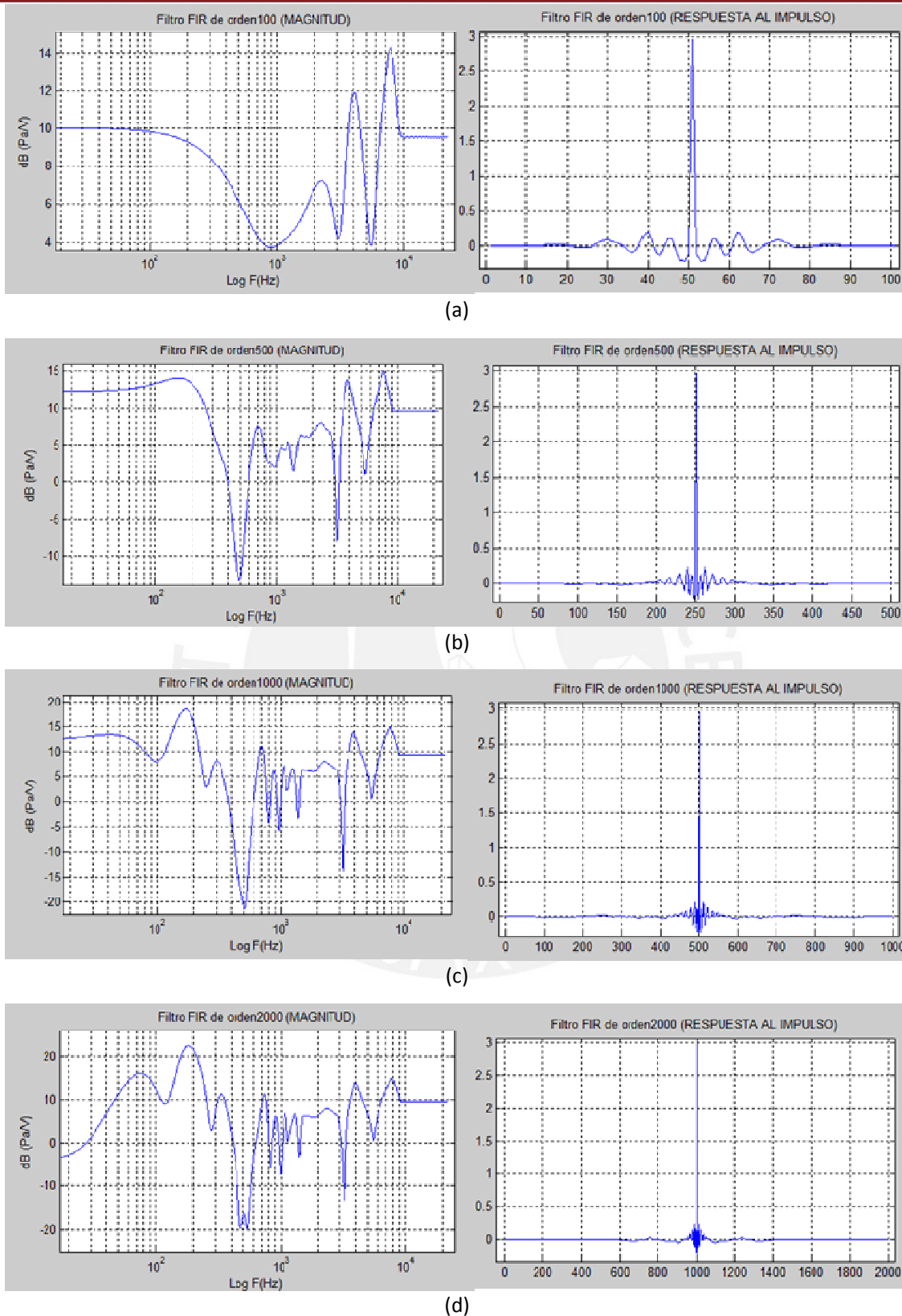
Se desarrolló un filtro FIR teniendo como respuesta en frecuencia deseada, aquella hallada para el filtro ecualizador con el método del actuador. La figura 3.13 muestra los puntos de referencia seleccionados en la gráfica de la magnitud del filtro hallado en la sección 3.4.4. Se adjunta los valores exactos de los vectores “frecuencia” y “amplitud” en el Anexo 3.



**FIGURA 3.13.** Puntos de referencia usados para la generación del filtro FIR, tomados a partir de la medición con el método del actuador, usando el comando FIR2 de Matlab.

Una vez definidos los puntos de frecuencias de referencia y sus respectivas amplitudes, se genera el filtro en Matlab. Se generó 4 filtros, que variaban únicamente en el orden (valor de  $N$ ). La figura 3.14 muestra que conforme aumenta la cantidad de coeficientes (es decir, el orden) del filtro, la magnitud de la respuesta del filtro obtenido se acerca más a la deseada.

Una vez se obtienen los coeficientes del filtro (que conforman la respuesta al impulso), se efectúa una convolución entre la canción grabada con la guitarra electroacústica y el filtro FIR. Por audición informal, se aprecia una mejora significativa del sonido del instrumento, casi similar a la obtenida con el ecualizador gráfico de Adobe Audition. Aunque audiblemente, la variación no es tan significativa a partir de  $N = 500$ , el filtro de mayor orden es el que genera una ecualización más acertada.



**FIGURA 3.13.** Magnitud y respuesta al impulso de filtros FIR generados con Matlab, para diferentes valores de  $N$ , el orden del filtro. a)  $N=100$ , b)  $N=500$ , c)  $N=1000$ , d)  $N=2000$ .

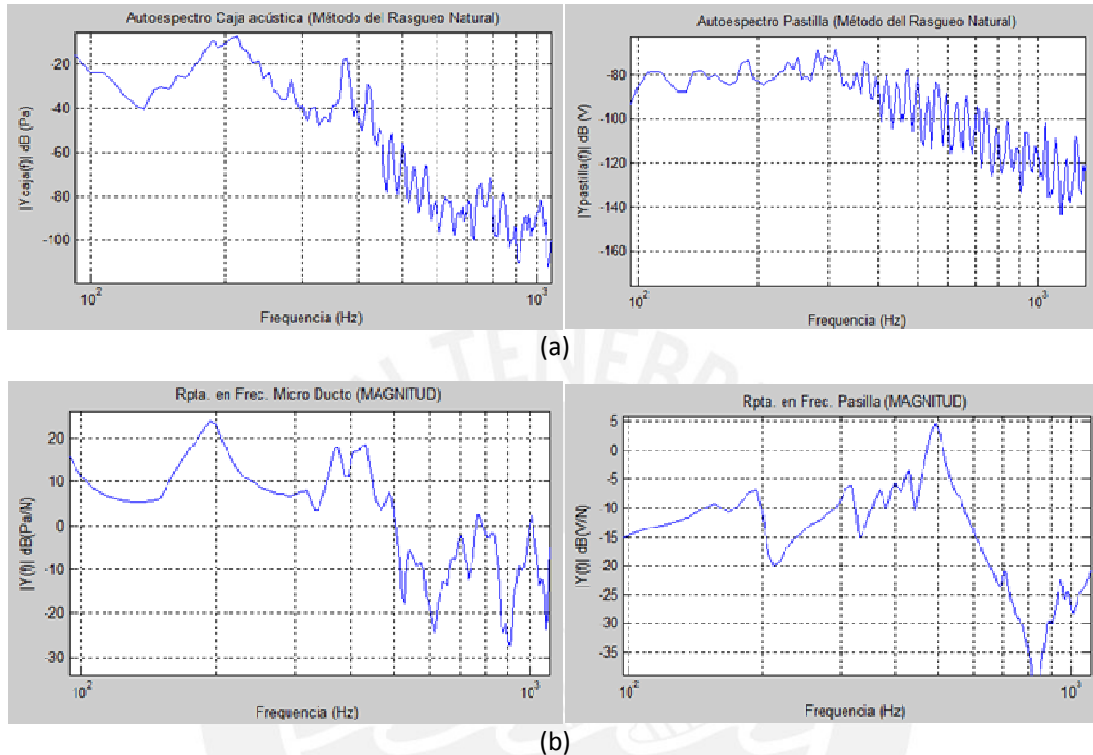
## 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 4.1. Comparación entre los métodos de medición

Al comparar los resultados (gráficas de respuesta de la guitarra, pastilla y filtro ecualizador) obtenidos con los tres métodos utilizados, se puede establecer algunos puntos de comparación:

- i) El método del martillo es el menos preciso, debido a que se excita el puente con el golpe de un martillo, y la uniformidad de las componentes de frecuencia depende en gran medida de la respuesta del mismo. En el caso de esta investigación, el golpe del martillo utilizado generaba mayores amplitudes en bajas frecuencias (debajo de 300 Hz). Esto se demuestra al observar las gráficas obtenidas con el método del actuador, pues el actuador emite una señal de amplitud constante y con absoluta precisión al puente, y las gráficas obtenidas presentan menor amplitud de las resonancias en bajas frecuencias.
- ii) El método del rasqueo natural representa el método más práctico de los tres, puesto que aunque el montaje es simple, no se sacrifica en gran medida la precisión de las mediciones. Sin embargo, al observar de cerca las gráficas de respuesta de la caja y la pastilla obtenidas con este método, se puede apreciar que las gráficas no corresponden con total exactitud a la respuesta de la caja y la pastilla montada sobre el puente. Esto se muestra en la figura 4.1.a, donde se ve que ambas gráficas (caja y pastilla), en lugar de mostrar una curva suave, muestran un “rizado”. Este rizado corresponde a los armónicos de las notas particulares de la guitarra, cuyos valores de amplitudes están superpuestos sobre la curva suave de la respuesta en frecuencia, tanto de la caja, como de la pastilla montada sobre el puente (figura 4.1.b). De este análisis se desprende que el barrido en frecuencias con el método del rasqueo no tiene una forma

plana y constante en el rango de frecuencias (como sí la tiene el ruido blanco), sino que más bien, presenta picos de amplitud en las frecuencias armónicas de cada una de las notas.



**FIGURA 4.1.** Diferencia en la repuesta de la caja y la pastilla al realizar la medición (a) con el método del rasqueo natural, donde se observa la presencia de los armónicos de las cuerdas; y (b) con el método del actuador, donde sólo se aprecia la presencia de los modos de la tapa frontal.

- iii) Pese a la característica no uniforme del barrido de frecuencias de la señal excitadora con el método del rasqueo natural, la respuesta en frecuencia del filtro ecualizador, hallada con este método, es bastante buena (ver figura 3.7). Esto ocurre debido a que ambas gráficas, la de la caja y la de la pastilla en el puente, poseen la misma señal de excitación; y aunque esta no sea uniforme, los armónicos introducidos por la misma, al dividir ambos autoespectros, se anularán casi completamente entre sí. Por ello, de este análisis, se corrobora que el método del rasqueo natural es el más conveniente desde el punto de vista del compromiso entre simplicidad del montaje y precisión de los resultados.
- iv) Sin duda, el método del actuador es, desde el punto de vista de la precisión, el mejor de los tres. Esto es debido a que no sólo se cuenta con información sobre la señal de excitación al puente (que en los otros dos casos no fue posible de

medir), sino que esta señal (ruido blanco) es generada por el analizador, lo que garantiza la uniformidad de la misma, y la limpieza (libre de armónicos no deseados) de las gráficas de respuesta en frecuencia tanto de la caja, como de la pastilla montada en el puente (figura 4.1.b).

#### **4.2. Comparación entre los filtros con software comercial y científico**

Al analizar mediante audición informal los resultados obtenidos al procesar la pieza musical mencionada en las secciones 3.5.1 y 3.5.2; se observa que tanto el filtro obtenido con Adobe Audition, como el filtro FIR generado en comandos de Matlab, responden según las expectativas. Un análisis objetivo de ambos resultados muestra lo siguiente:

- i) El filtro generado con Adobe Audition responde con más precisión los requerimientos que el filtro FIR de Matlab, para un mismo valor de N (el orden del filtro).
- ii) Sin embargo, el filtro generado con Matlab (para valores de N entre 500 y 2000), a partir de la gráfica de la figura 3.10, puede ser optimizado con mucha mayor precisión que aquel generado en Adobe Audition. Esto debido a que los comandos de Matlab ofrecen absoluto control sobre los valores de amplitud y frecuencias de referencia, cosa que no ofrece el ecualizador gráfico de Audition (p.ej.: las 30 bandas de ecualización están fijas, en valores de frecuencia invariables).

#### **4.3. Análisis de costos de la investigación**

Se describe en la tabla 4.1, el detalle de los costos de realizar esta investigación, desde una perspectiva comercial. Se puede afirmar, teniendo en cuenta la experiencia adquirida durante el período de investigación y en las sesiones de laboratorio, que una investigación como esta podría realizarse en una sola sesión de laboratorio (de aproximadamente 3 a 4 horas), según lo cual se estima el costo de alquiler de cada uno de los equipos de laboratorio requeridos (ítems 3.1 hasta 3.6). Adicionalmente, se añade el costo por el servicio de realizar las mediciones de laboratorio, y posteriormente realizar el desarrollo en software del filtro ecualizador digital. Estos ítems ascienden a US\$ 500.00 (Quinientos dólares americanos, en la tabla 4.1.b). Si añadimos el valor de la guitarra acústica (es decir,

en caso de que un supuesto cliente que adquiera el servicio quiera adquirir una guitarra electroacústica como parte del paquete), el costo total es de US\$ 655.00 (Seiscientos cincuenta y cinco dólares americanos).

No.	ITEM/SERVICIO		COSTO
1.	Guitarra acústica MARUJO	US\$	120.00
2.	Pastilla piezoeléctrica ARTREC		35.00
3.	Instrumentos de laboratorio (Alquiler)		
3.1.	Analizador B&K		55.00
3.2.	Micrófono		25.00
3.3.	Amplificador		25.00
3.4.	Actuador		25.00
3.5.	Sensor de fuerza		25.00
3.6.	Velocímetro láser		45.00
4.	Mediciones en el laboratorio		180.00
5.	Desarrollo de filtros y simulaciones		120.00
		<b>TOTAL US\$</b>	<b>655.00</b>

(a)

No.	ITEM/SERVICIO		COSTO
1.	Instrumentos de laboratorio (Alquiler)		
1.1.	Analizador B&K		55.00
1.2.	Micrófono		25.00
1.3.	Amplificador		25.00
1.4.	Actuador		25.00
1.5.	Sensor de fuerza		25.00
1.6.	Velocímetro láser		45.00
2.	Mediciones en el laboratorio		180.00
3.	Desarrollo de filtros y simulaciones		120.00
		<b>TOTAL US\$</b>	<b>500.00</b>

(b)

**TABLA 2.1.** Detalle de los costos de realización de la investigación. a) Considerando la compra de una guitarra y pastilla de calidad similar a las utilizadas. b) Sin considerar la compra de la guitarra y pastilla.

#### 4.4. Encuesta sobre los resultados obtenidos

Con la finalidad de calificar el éxito de la investigación, desde la medición de los datos, hasta la ecualización con Adobe Audition y Matlab, se realizó una pequeña encuesta a 20 personas, para que califiquen la calidad del procesamiento de la señal, tanto por el filtro generado en Adobe Audition, como los filtros generados por Matlab.



Los encuestados realizaron las siguientes tareas:

- Escuchar una pieza grabada con la guitarra utilizada en las mediciones, usando un micrófono de alta fidelidad, muestreada con la computadora a 48 kHz.
- Escuchar la misma pieza grabada de la pastilla de la guitarra utilizada en las mediciones, muestreada con la computadora a 48 kHz.
- Escuchar la misma pieza filtrada usando:
  - Adobe Audition 1.5.
  - Filtro FIR de orden 200 implementado en Matlab v.10a.
  - Filtro FIR de orden 200 implementado en Matlab v.10a.
- Calificar la calidad de la pieza procesada con cada uno de los métodos, con un criterio del 1 al 10, donde 10 es un sonido completamente natural, y 1 un sonido de calidad muy pobre.

Se solicitó a cada persona encuestada de manera no presencial, escuchar las piezas de audio con audífonos o altoparlantes de calidad media a alta; ello significa básicamente, que se trate de altoparlantes o audífonos que tengan una respuesta idealmente plana, que permitan sobre todo la percepción clara de los sonidos de baja frecuencia.

Los resultados de la encuesta fueron los mostrados en la tabla 2.2 (el detalle de las encuestas se adjunta en el Anexo 5):

	Puntaje Promedio
<b>Señal filtrada con Adobe Audition</b>	7.05/10
<b>Señal filtrada con filtr FIR, N = 200</b>	4.85/10
<b>Señal filtrada con filtr FIR, N = 2000</b>	7.1/10

**TABLA 2.2.** Resultados globales de la encuesta sobre los filtros aplicados.

Se puede apreciar que un análisis subjetivo del público, arroja que el filtro FIR desarrollado en Matlab, de orden 2000, obtuvo el mejor resultado, muy cerca de la calificación del filtro obtenido con Adobe Audition. Y ambas calificaciones son apreciadas por el público como cercanas al sonido natural de la guitarra (cercanas a 10).

## 5. CONCLUSIONES

- **Sobre la influencia de la pastilla en el sonido natural de la guitarra acústica.-** La “decoloración” del sonido de la guitarra al ser amplificada por medio de la pastilla se debe principalmente a 3 factores:

- i. La respuesta en frecuencia de la pastilla no es plana, sino que presenta principalmente una pendiente ascendente, además de un pico de resonancia en aproximadamente 675 Hz, lo cual afecta considerablemente el timbre del sonido obtenido del transductor, con respecto al del instrumento.
- ii. La pastilla, al ser un transductor de contacto y estar ubicada sobre el puente de la guitarra, no puede captar con la intensidad debida la resonancia de Helmholtz, (señal acústica proveniente de la vibración del volumen de aire al interior de la caja, en conjunto con la masa de aire del agujero). Esta resonancia es radiada con mayor intensidad a través de la boca de la guitarra, y captada de manera óptima por un micrófono; no obstante, la resonancia de Helmholtz puede ser detectada en el puente, pero con menor amplitud.
- iii. La ubicación de la pastilla en la tapa frontal le permite captar favorablemente las resonancias de la misma que presentan modos (puntos de máxima amplitud) en zonas cercanas al puente, pero no capta con la intensidad debida las resonancias que se presentan debido a puntos de máxima amplitud en otras zonas de la tapa. Un micrófono en cambio recibe por igual las resonancias producidas en toda la superficie de la tapa frontal.

- **Sobre la corrección de la influencia de la pastilla en el timbre de la guitarra acústica.-** La corrección de la influencia de la pastilla piezoeléctrica consiste principalmente en amplificar las dos resonancias en bajas frecuencias, correspondientes al resonador de

Helmholtz, y a la primera resonancia de la tapa frontal, ya que estas dos resonancias son las más atenuadas por la pastilla, y al mismo tiempo son las que contribuyen en mayor medida a dar el timbre característico y natural al instrumento. La forma exacta de respuesta en frecuencia del filtro ecualizador varía según la guitarra particular y el transductor utilizado.

**- Sobre los métodos de medición y la obtención del filtro ecualizador.-** De los tres métodos aplicados para la medición de la respuesta en frecuencia de la caja y la pastilla se concluye que el método del rasgueo resulta el más conveniente, si se busca lograr un equilibrio entre precisión de las mediciones y simplicidad de las mismas. Sin embargo, el método que arroja resultados mucho más precisos y certeros, es el método del actuador.

El filtro ecualizador que compensa la señal de la pastilla es realizable de manera digital, desarrollando un filtro FIR en Matlab. Sin embargo, el orden del filtro es elevado, y por ende, complicada su implementación en tiempo real.

**- Sobre la calidad de la respuesta en frecuencia de los filtros generados.-** Según apreciación propia y una encuesta a un público de 50 personas, el filtro FIR generado con Matlab produce resultados tanto o más satisfactorios que la ecualización gráfica usando software editor de audio; con la ventaja de que, al generar un filtro en Matlab, se tiene la información exacta de cada uno de los coeficientes del filtro. Por ende, el desarrollar el filtro FIR en Matlab, con resultados satisfactorios, es el primer paso hacia la implementación de un filtro optimizador de sonido para guitarra acústica en DSPs (Procesadores digitales).

## 6. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

**Explorar la opción de filtros analógicos basados en Opamps (amplificadores operacionales).**- Al funcionar como filtros pasa banda, permitan obtener la forma deseada del filtro ecualizador. La ventaja de una solución analógica es el bajo costo de implementación y producción; y, por ende, la posibilidad de competir en el mercado local.

**Optimizar el Filtro diseñado con Matlab.**- El filtro FIR ofrece una respuesta aceptable, sin embargo, para una aplicación en tiempo real, será recomendable trabajar con un filtro de menor orden, pero que mantenga la precisión de la respuesta en frecuencia deseada. Esto orienta la investigación futura al trabajo con filtros digitales IIR.

**Trabajar en una solución de amplificación que combine micrófono y pastilla, utilizando un micrófono de bajo costo.**- En el laboratorio se ha logrado modificar las características (directividad y respuesta de frecuencia) de un micrófono de bajo costo, el cual podría situarse muy cerca al agujero, dentro de la caja acústica (el agujero es un punto de radiación sonora importantísimo en la guitarra), para captar la resonancia de Helmholtz de la caja. La señal del micrófono podría filtrarse, quedándonos sólo con la banda de bajas frecuencias, y sumarse a la señal de la pastilla, para así “devolverle” el cuerpo a la guitarra.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Torres, J., & Ruiz B., R. (2008). *Identificación a simple vista de patrones de vibración de una tapa de guitarra*. D.F. México.
- [2] AZIMA / DLI. (s.f.). Recuperado el 24 de Mayo de 2009, de <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/mododevibracin1.htm>
- [3] Pakarinen, J., Välimäki, V., & Karjalainen, M. (2005). "Physics-Based Methods for Modeling Nonlinear Vibrating Strings", ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA , **91**, 312-325.
- [4] Pakarinen, J., Välimäki, V., Erku, C., & Karjalainen, M. (2006). "Discrete-time modelling of musical instruments". *REPORTS ON PROGRESS IN PHYSICS* , **69**, 1-78.
- [5] "California Inventor Develops Musical Instrument Undersaddle Pickup." US Fed News Service, Including US State News. HT Media Ltd. 2007.
- [6] M. Karjalainen, V. Välimäki, H. Penttinen, and H. Saastamoinen, "DSP equalization of electret film pickup for the acoustic guitar". *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 48, no. 12, pp. 1183-1193, Dec. 2000.
- [7] M. Karjalainen, H. Penttinen, and V. Välimäki, "More acoustic sounding timbre from guitar pickups," in *Proc. 2nd G-6 Workshop on Digital Audio Effects* (DAFX'99), pp. 41-44, Trondheim, Norway, Dec. 9-11, 1999.
- [8] J. Pakarinen, "Modeling of Nonlinear and Time-Varying Phenomena in the Guitar", Doctoral Thesis, Helsinki University of Technology, March 4, 2008.

- [9] J. Pakarinen. "Spatially Distributed Computational Modeling of a Nonlinear Vibrating String." MSc Thesis, Helsinki University of Technology, June 14, 2004.
- [10] H. Penttinen, "Acoustic Timbre Enhancement of Guitar Pickup Signal with Digital Filters". Dec. 2002.
- [10a] H. Penttinen, "A time-domain approach to estimating the plucking point of guitar tones obtained with an under-saddle pickup". Dec. 2004.
- [11] Wikipedia. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Chladni\\_guitar.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Chladni_guitar.png)
- [12] <http://www.flipkart.com/physics-musical-instruments-neville-fletcher/0387983740-pvw3fzke1e#previewbook> (*Versión On-Line del Libro: Fletcher, N. H. and Rossing, T. (1991). The Physics of Musical Instruments. Springer-Verlag. New York, U.S.*)
- [13] <http://www.artenetsgae.com/anuario/anuario2005/anuariopdfs/04Grabada/01CapGrabada.pdf>
- [14] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [15] Pueo Ortega, B., "Electroacústica: altavoces y Micrófonos". 2003.
- [16] Rossing, T. D. "The Science of Sound". 1990.
- [17] Beranek, L., "Electroacustics". 1960.
- [18] Randall, A. B., "Frequent Analysis". Brüel & Kjaer. 1987.
- [19] [www.bksv.com](http://www.bksv.com)
- [20] <http://www.taringa.net/posts/musica/1404991/Todo-sobre-Guitarra.html>
- [21] Vorländer, M. "Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality". RWTH Edition. 2008.
- [22] <http://www.crownaudio.com>



- [23] <http://www.acousticeig.unige.ch/Docs/DataSheets/BruelKjaer/BK8200.pdf>
- [24] <http://ukecosas.es/es/accesorios/shadow-sh-1110-uk.html>
- [25] Möser M.; Barros J. L. “Ingeniería Acústica: Teorías y Aplicaciones”. Springer-Verlag. New York. Set. 2009.
- [26] C. Llimpe, J. Moreno. “Estudio preliminar teórico-experimental de las características acústicas del cajón peruano”. II Congreso Iberoamericano de Acústica - XXXI Congreso Nacional “Tecni-Acústica”. Madrid, Oct. 2000.

